

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

**VLIV FYZICKÝCH PARAMETRŮ A STÁŘÍ
SILNOPROUDÉHO VEDENÍ NA KOMUNIKACI POMOCÍ
PLC/BPL**

INFLUENCE OF PHYSICAL PARAMETERS AND AGE OF POWER LINES ON PCL/BPL PERFORMANCE
AND RELIABILITY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. Jan Janás

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Lukáš Beneš

BRNO 2021

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Telekomunikační a informační systémy**

Ústav telekomunikací

Student: Ing. Jan Janás

ID: 184309

Ročník: 3

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Vliv fyzických parametrů a stárí silnoproudého vedení na komunikaci pomocí PLC/BPL

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je provést analýzu fyzických parametrů (spojky, délky, materiál) a stárí silnoproudých vedení na výkonnosti a spolehlivosti PLC/BPL komunikace na úrovni vysokého a nízkého napětí.

Dílčím cílem je provést sadu měření jednotlivých PLC/BPL technologií na vedení s jasným popisem fyzických parametrů. Dále pak provést srovnání s dostupnými daty z měření v různých lokalitách.

Hlavním cílem práce je návrh postupů pro odhalení problémových tras silnoproudého vedení před samotnou instalací PLC/BPL. Výstupem je matematický model a vizualizace jenž dokáže prediktivně určit problém samotného vedení při zadání fyzických a topologických parametrů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Hrasnica, H. Broadband Powerline Communications Networks. John Wiley & Sons, Chichester 2004. ISBN 0-470-85741-2.

[2] Power line communications: theory and applications for narrowband and broadband over power lines. 1st ed. Editor Hendrik Ferreira. Chichester: John Wiley, 2010, 507 s. ISBN 978-047-0740-309.

Termín zadání: 1.2.2021

Termín odevzdání: 31.5.2021

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Beneš

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Se zvyšujícími se nároky na datový přenos se hledají i jiné cesty, než standardní datový přenos přes klasické datové kabely. Jednou z těchto cest je i komunikace po silnoprůdém vedení - technologie PLC a její podskupina BPL. Tento způsob komunikace má široké využití v domácnostech, energetice, průmyslu a v dalších oborech, kde se používá například ke sběru dat, komunikaci, nebo ovládání různých zařízení. Než se však začne o nasazení BPL technologie uvažovat, je nutné nejprve vyhodnotit uvažované silnoprůdém vedení, jestli je k tomu účelu vhodné a technicky způsobilé.

KLÍČOVÁ SLOVA

PLC, BPL, spojka, silnoprůdém kabel, koeficient technického stavu, Home Plug, datový přenos, modem, IPerf3, fyzické parametry vedení

ABSTRACT

With the increasing demands on data transmission, other ways are being sought than standard data transmission via conventional data cables. One of these ways is communication over power lines - PLC or BPL technology. This method of communication is widely used in households, energy, industry and other fields where it is used for data collection, communication, or control of various devices. Before considering the use of BPL technology, it is first necessary to evaluate the considered power line to see if it is suitable and technically competent for this purpose.

KEYWORDS

PLC, BPL, connector, power cable, coefficient of technical condition, Home Plug, data transmission, modem, IPerf3, physical parameters of the line

JANÁŠ, Jan. *Vliv fyzických parametrů a stáří silnoprůdého vedení na komunikaci pomocí PLC/BPL*. Brno, 2021, 58 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: Ing. Lukáš Beneš

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Vliv fyzických parametrů a stáří silnoproutého vedení na komunikaci pomocí PLC/BPL“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing.Lukáši Benešovi. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	10
1 Technologie PLC	11
1.1 Princip PLC technologie	11
1.2 Základní dělení PLC technologie	11
1.3 Výhody PLC technologie	13
1.4 Nevýhody PLC technologie	13
2 Strojové učení pro diagnostiku elektrických sítí	14
2.1 Metody strojového učení	14
2.1.1 Učení s učitelem	14
2.1.2 Učení bez učitele	15
2.2 Neuronové sítě	16
2.2.1 Vstupní data FFNN	17
2.2.2 Výsledky FFNN	17
3 Fyzické parametry a topologie distribuční sítě	18
3.1 Vzdálenost opakovačů	18
3.2 Typ kabelu	18
3.2.1 PILC kabely	19
3.2.2 XLPE kabely	21
3.3 Stáří kabelu	22
3.4 Kabelové soubory	22
3.4.1 Počet spojek	23
3.4.2 Typ spojky	23
3.4.3 Stáří spojky	23
3.4.4 Typ koncovky	24
3.4.5 Stáří koncovky	24
3.5 Návrh modelu technického stavu vedení	25
3.5.1 Rozpis jednotlivých parametrů	25
3.5.2 Příklad výpočtu	27
4 Měření	29
4.1 Měření propustnost sítě k jednotlivým bodům	29
4.1.1 Metodika měření	29
4.2 Měření propustnost sítě s prodloužením	37
4.2.1 Metodika měření	37
4.2.2 Měření TCP spojení	38

4.2.3	Měření UDP spojení	39
4.2.4	Porovnání TCP a UDP spojení	48
Závěr		50
Literatura		51
Seznam symbolů, veličin a zkratk		53
Seznam příloh		55
A Topologie měření		56
B IPerf 3 vzor kódu		57
B.1	Comfast	57
B.2	Zyxel	57
B.3	Cisco	58
B.4	Devolo	58

Seznam obrázků

1.1	Rozdělení pásem PLC technologie.	12
2.1	Rozdělení pásem PLC technologie [9].	15
2.2	Model neuronové sítě [10]	16
4.1	Schéma zapojení měření propustnosti sítě bytové jednotky.	30
4.2	Závislost přenosové rychlosti na vzdálenosti modemu Comfast CF-W200M.	31
4.3	Závislost přenosové rychlosti na vzdálenosti modemu Zyxel PLA5206.	32
4.4	Závislost přenosové rychlosti na vzdálenosti modemu Cisco PLE500.	33
4.5	Závislost přenosové rychlosti na vzdálenosti modemu Devolo.	34
4.6	Porovnání použitých PLC modemů.	36
4.7	Schéma zapojení během měření propustnosti sítě.	37
4.8	TCP měření maximální přenosové rychlosti.	38
4.9	UDP parametry Comfast.	40
4.10	UDP parametry Zyxel.	41
4.11	UDP parametry Cisco.	43
4.12	UDP parametry Devolo.	45
4.13	Porovnání ztrátovosti datagramů.	46
4.14	Porovnání UDP jitter.	47
4.15	Celkové porovnání ztrátovosti a jitteru UDP měření.	47
4.16	Porovnání přenosové rychlosti TCP a UDP.	49
A.1	Topologie bytu s měřenými body	56
B.1	Comfast O1-P3	57
B.2	Zyxel O1-P3	57
B.3	Cisco O1-P3	58
B.4	Devolo O1-P3	58

Seznam tabulek

3.1	Tvorba písmen značení na kabelu PILC [17]	20
3.2	Tvorba písmen značení na kabelu XLPE [19]	21
3.3	Izolační materiály kabelových vedení [15]	22
3.4	Jednotlivé koeficienty modelu technického stavu vedení	27
3.5	Vzorový výpočet koeficientu	28
4.1	Technická data použitých zařízení	29
4.2	TCP propustnost Comfast CF-WP200M	31
4.3	TCP propustnost Zyxel PLA5206.	32
4.4	TCP propustnost Cisco PLE500.	33
4.5	TCP propustnost Devolo Magic 2.	34
4.6	Porovnání použitých PLC modemů.	36
4.7	TCP měření přenosové rychlosti.	38
4.8	UDP měření modemem Comfast.	40
4.9	UDP měření modemem Zyxel.	41
4.10	UDP měření modemem Cisco.	43
4.11	UDP měření modemem Devolo.	45
4.12	Porovnání jednotlivých zařízení	47
4.13	Maximální rychlost protokolem TCP a UDP.	49

Úvod

V současné době roste každým dnem objem přenášených dat a spolu s tímto trendem roste i potřeba nových datových sítí. Stále více zařízení se vzájemně propojuje do komunikační sítě, například ke sledování daného zařízení, tak i k jeho kontrole a vzdálenému ovládání. S tímto trendem jsou spojeny vysoké náklady na stavbu nových datových sítí a proto se hledají technologie, které by mohly využít volnou kapacitu sítí stávajících. V některých případech je stavba nových sítí problematická, často stavbě brání důvody jako je například nemožnost budovat nové datové sítě v městské zástavbě z důvodu památkovým či jiných omezení, případně nemožnost využití jiné technologie k přenosu dat. Navíc některá místa, která je potřeba navzájem propojit, jsou natolik odlehlá a nedostupná, že by se to ani finančně nevyplatilo.

Jednou z těchto technologií, která nepotřebuje vysoké investice do nové infrastruktury je technologie PLC (Power Line Communication). PLC technologie využívá stávající distribuční elektrickou síť a to jak na krátké datové přenosy s vysokou přenosovou rychlostí, tak i na dlouhé přenosy. Technologie je vhodná jak k přenosu dat, tak i k dálkovému odečtu a řízení jednotlivých zařízení. PLC technologie je nedílnou součástí distributorů elektrické energie, kdy za pomoci senzorů na elektrické trase, dokáže určit problémy na daném úseku. Navíc v dnešní době stále roste poptávka po elektrických automobilech a jedním z řešení je i PLC technologie, která může efektivně sledovat a usměrňovat množství elektrického proudu během nabíjení elektromobilu.

Tato bakalářská práce se zabývá analýzou fyzických parametrů, které mají největší vliv na kvalitu přenášeného signálu po distribuční elektrické síti. Práce analyzuje především vzdálenosti mezi jednotlivými trafostanicemi, kvalitu a stáří kabelu a propojovacích spojek vedení. Z těchto parametrů je následně vytvořen koeficient, který dokáže prediktivně určit, jestli je daná trasa vhodná k nasazení PLC technologie. Součástí práce je i sada měření v bytové jednotce a následná analýza.

1 Technologie PLC

Na konci 19. století začaly vznikat první stejnosměrné elektrické sítě a už v té době se začalo uvažovat jak využít síť i k přenosu zpráv. Tou dobou se začala do stejnosměrné složky sítě přidávat složka střídavého napětí, což umožnilo jednoduchý komunikační systém po síti. Další významný pokrok nastal ve 30. letech 20. století se vzrůstající potřebou systémů dálkového ovládání a řízení. Z jediného centrálního bodu se vysílal signál do sítě, která často byla velmi rozvětvená a tento signál následně ovládal zařízení. Jednalo se především o spínání, či generování jednoduchého signálu. Před druhou světovou válkou, s rostoucí výstavbou dálkových silnoproudých vedení, se začalo uvažovat o využití této sítě i pro telefonní komunikaci [1]. V předválečném Československu začala společnost Telegrafia Praha experimentovat s vysokofrekvenční elektrárenskou telefonii a zároveň začala první výroba k tomu potřebných zařízení.

Začátkem 80. let 20. století dochází k nástupu širokopásmových přenosů po energetickém vedení. Z počátku přenosové rychlosti dosahovaly jednotek Mbit/s, dnes se můžeme běžně setkat s přenosy ve stovkách Mbit/s.

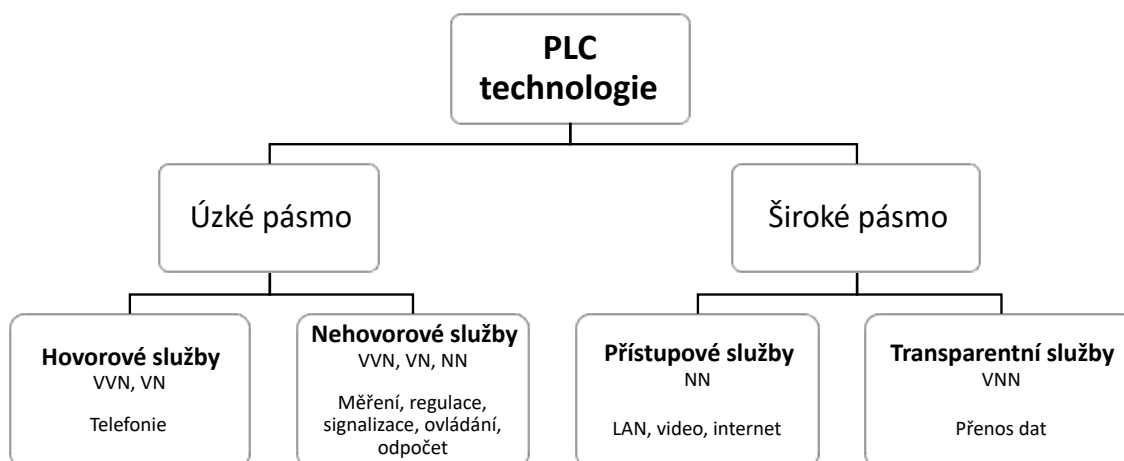
1.1 Princip PLC technologie

Technologie PLC využívá silnoproudé vedení k přenosu datových toků [2]. Silnoproudá vedení elektrické distribuční sítě využívají frekvenci 50 Hz, vyšší frekvence, vhodné pro přenos dat, jsou tedy nevyužité. Aby bylo možné nevyužité vysoké frekvence používat, je nutné data na začátku, před samotným vysíláním zprávy, modulovat a na konci zprávu zase zpětně demodulovat. Modulovaný signál prochází vazebním prvkem, vazební prvky se nacházejí na začátku a na konci silnoproudého vedení z důvodu ochrany komunikačního zařízení před silovým napětím (230 V/50 Hz). Vazební prvky zároveň zajišťují, aby byl vyslaný a přijatý signál v požadovaném rozmezí frekvenčního pásma [3].

Technologie v závislosti na šířce pásma nachází využití převážně pro přenos dat a dálkové měření, ovládání, signalizaci a podobně. S technologií PLC je možné se setkat i v běžné domácnosti, kde není možné využít bezdrátovou komunikaci, například technologii Wi-Fi, z důvodu její nižší přenosové rychlosti a stability.

1.2 Základní dělení PLC technologie

Nejzákladnějším dělením PLC technologie je dělení dle šířky pásma. Nejčastěji je možné se setkat s rozdělením na širokopásmovou a úzkopásmovou PLC komunikaci 1.1.



Obr. 1.1: Rozdělení pásem PLC technologie.

Technologie úzkého pásma

Úzkopásmová technologie je historicky nejstarší, začala se objevovat již ve 30. letech minulého století. Nejprve se objevovaly signalizační protokoly pro vysoké napětí v rozmezí 10–20 kV a po nějaké době i pro napětí nízká 230/400 V [4],[5]. Následně se úzkopásmová technologie začala ubírat směrem k dálkovým odečtům. S rozvojem průmyslové automatizace se stále častěji technologie uplatňuje ke kontrole, monitorování a ovládání průmyslových strojů. Výhodou úzkopásmových technologií je jejich spolehlivost, kvalita přenosu a bezpečnost. Nevýhodou komunikace využívající úzkého pásma je její krátký dosah.

Technologie širokého pásma

Technologie širokého pásma, nebo taky BPL (Broadband power line) se využívá v infrastruktuře rozvodových energetických sítí [4]. Klade se zde důraz na rychlost přenosu dat, proto je možné se rovněž setkat s pojmem přístupové sítě. Technologie širokého pásma umožňují snadný přístup k LAN (Local area network) sítím a internetu. Spolu s internetem a LAN sítí se často využívá i k dálkovému ovládání síťových zařízení, za zmínku stojí například současný trend tzv. chytré domácnosti, kde tyto sítě často ovládají klimatizaci, osvětlení a další prvky v domě.

Z důvodu eliminace rušení a interferencí, Evropský výbor pro normalizaci v elektrotechnice CENELEC (Comité européen de normalisation électrotechnique) vytvořil normy o rozdělení kmitočtových pásem. Norma rozděluje a zároveň přiděluje jednotlivým technologiím a aplikacím jednotlivá kmitočtová pásma. Pro široká pásma jsou frekvence definovány v rozmezí od 3 kHz do 148,5 kHz. Pro některá pásma je nutné doložit přistoupení k dohodě o shodě, které obsahuje jisté požadavky na zařízení, jako například potřebu signálního detektoru pro každý vysílač, omezení vy-

sílacího času jednotlivých zařízení na jednu sekundu a další technické parametry a omezení.

- A - 9–95 kHz - pásmo pro dodávky elektrické energie, hlavně pro dodavatele
- B - 95–125 kHz - soukromé účely uživatelů
- C - 125–140 kHz - soukromé účely uživatelů s požadavkem protokolu o přistoupení k dohodě
- D - 140–148,5 kHz - soukromé účely uživatelů

1.3 Výhody PLC technologie

Výhod PLC technologie je celá řada, v následujícím popisu jsou vybrána ta, která jsou považována za nejdůležitější a nejvýhodnější [6].

- Technologie využívá stávající, již existující elektrickou síť a proto není potřeba další kabeláže, vedení, antén případně dalších stavebních prací. Navíc elektrické rozvody se nacházejí ve většině objektů a budov, dostupnost služby je tedy velmi vysoká.
- Má dostatečnou přenosovou rychlost. V závislosti na modemu, kvalitě sítě a vzdálenosti, se přenosové rychlosti pohybují od jednotek Mbit/s až po Gbit/s.
- Značnou výhodou je instalace PLC zařízení na již stávající síť. Děje se tak za plného provozu, není potřeba přerušit elektrické vedení, případně další odstavky.

1.4 Nevýhody PLC technologie

PLC technologie má samozřejmě i řadu nevýhod, které jsou spojeny s přenosem na silnoproudých vedeních. Řada těchto problémů a omezení brání širšímu rozšíření technologie.

- Relativně velkým problémem PLC technologie je rušení. PLC technologie využívá silnoproudá vedení, z tohoto důvodu je kvalita signálu značně ovlivněna odbočkami vedení, dále pak spínáním různých spotřebičů na trase. S tímto jevem je spojena celková chybovost systému, jelikož silnoproudé rozvody nebyly primárně navrženy pro datový přenos.
- Vysoká přenosová rychlost na krátké vzdálenosti, avšak s rostoucí vzdáleností přenosová rychlost rapidně klesá. Na krátké vzdálenosti se rychlost pohybuje až v Gbit/s, naproti tomu na delší vzdálenosti přenosová rychlost klesá na desítky až jednotky Mbit/s.

2 Strojové učení pro diagnostiku elektrických sítí

Jednou z nejvýznamnějších částí umělé inteligence je tzv. strojové učení. Základem strojového učení je postupné získávání zkušeností a schopností z vykonaných procesů. Umělá inteligence následně využije tyto získané zkušenosti a adaptuje se, což zjednodušeně znamená, že bude mít potřebné znalosti, aby analyzovala a vyřešila problém postupem, který již má naučený [10].

Nástup umělé inteligence, stejně jako ostatní obory, zasáhl i oblast energetiky. Umělá inteligence a strojové učení nachází uplatnění například v diagnostice a efektivním využití obnovitelných zdrojů. Společnost ČEZ a.s. (České energetické závody) zvažuje nasazení dronů pro kontrolu fotovoltaických a větrných elektráren. Drony oblast elektrárny zkontrolují, následně vyhodnotí zda se zde nachází problémy, které vyžadují zásah obsluhy elektrárny, případně servisní výjezd [7]. ČEZ rovněž využil umělou inteligenci k diagnostice zařízení v elektrárnách, kde analyzoval na základě zvuku běžícího stroje, jestli zařízení běží správně.

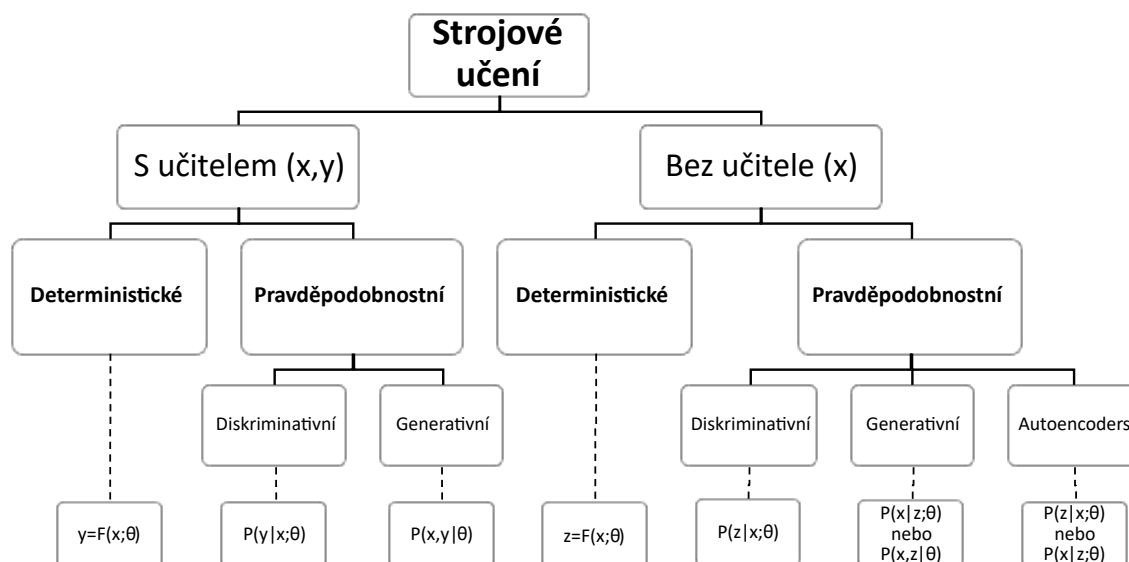
Samotnou kapitolou je diagnostika stávajících elektrických vedení, i zde najde uplatnění umělá inteligence. Provozovatel české přenosové soustavy ČEPS (Česká přenosová soustava) spolupracuje s dalšími evropskými zeměmi na několika projektech souvisejících s chytrými sítěmi. Chytrá síť, jejíž součástí je umělá inteligence, může sledovat energetickou soustavu, předpovídat možné poruchy a efektivně distribuovat elektrickou energii s ohledem na stabilitu a kapacitu sítě, zároveň i s ohledem na vlivy klimatických podmínek daného regionu.

2.1 Metody strojového učení

Strojové učení je možné rozdělit na dvě hlavní větve z hlediska způsobu učení. Jedná se o tzv. supervised learning, neboli učení s učitelem a unsupervised learning, tedy učení bez učitele. Každou z těchto metod je následně možné rozdělit na deterministické a pravděpodobnostní modely 2.1. Každá z těchto metod má svá specifika, výhody, nevýhody a možnosti uplatnění.

2.1.1 Učení s učitelem

Jedná se o analogii klasického vyučování s učitelem ve škole, kde učitel ve třídě vyučuje žáky. Během učení jsou známy konkrétní vstupní informace a zároveň je i znám správný výsledek x, y [8]. U klasifikačních algoritmů se jedná především o třídy, naopak u regresních algoritmů to bývají zpravidla hodnoty, nebo interval



Obr. 2.1: Rozdělení pásem PLC technologie [9].

hodnot. Stroj si zjednodušeně osvojí předem naučené postupy a ty následně využívá. Nevýhodou je vysoká časová a finanční náročnost takového způsobu učení a výsledná nižší efektivita i flexibilita reakce na nově vzniklý problém.

2.1.2 Učení bez učitele

U tohoto způsobu učení není předem znám výsledek, dokonce ani zda daná úloha má či nemá nějaké konečné řešení. Ke vstupním datům x neexistuje známý výstup y . Tato metoda se využívá v automatizovaných systémech, kde je nutné se rychle rozhodovat a reagovat na novou situaci [8]. Takovým místem může být například distribuční elektrická síť, kde je potřeba rychlého zásahu v případě poruchy.

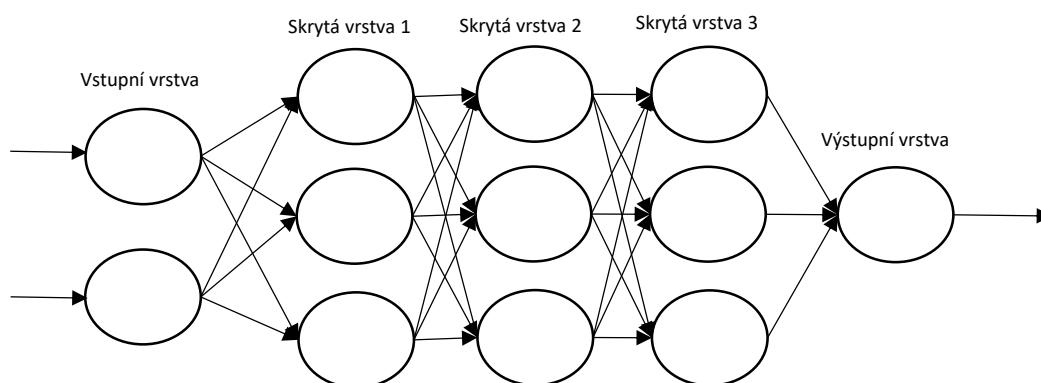
Ke zvýšení efektivity strojového učení se často kombinuje metoda s učitelem a bez učitele, která se využívá i k diagnostice eklektické sítě. Část vstupních dat, jako například topologie sítě, počet spojek, stáří sítě jsou známé a za dobu existence sítě jsou známy i výstupní data v podobě specifických průběhů poruch a dalších rysů dané elektrické sítě. Na těchto předem známých vstupních a výstupních datech se následně stroj učí a trénuje. Často je tento postup rozdělen do etap, kdy se v první etapě automaticky identifikují nejčastěji obsažené atributy, v další etapě, kterou například může realizovat skrytá vrstva neuronové sítě, se rozpoznávají vzájemné kombinace těchto atributů a dat. U prvních dvou etap se jedná o učení bez učitele, v dalších etapách se následně aplikuje učení s učitelem.

2.2 Neuronové sítě

Umělá neuronová síť je model sítě inspirovaný neuronovou sítí živočichů, skládá se z umělých neuronů s vzájemně propojenými vstupy a výstupy, které mezi sebou přenášejí signály. Díky této vzájemné komunikaci se síť učí a přizpůsobuje [10]. Umělé neuronové sítě nacházejí uplatnění v mnoha oborech, kde modelují různé technické systémy, které není možné jasně popsat klasickými matematickými funkcemi. Jedním z těchto oborů je i diagnostika silnoproudých vedení a elektrických sítí.

Neuronové sítě je možné naučit, na základě sesbíraných parametrů, vlastnosti daného elektrického vedení. Z těchto dat mohou neuronové sítě následně predikovat možné poruchy na trase v podobě konkrétní hodnoty, která bude definovat například procentuální pravděpodobnost vzniku závady v konkrétním místě trasy.

Nejčastějším typem neuronových sítí je opakující se neuronová síť a dopředná neuronová síť [11]. Tato práce se zaměří pouze na dopřednou neuronovou síť, neboli Feed forward neural network (FFNN). FFNN je nejběžnějším typem neuronové sítě, síť je snadno pochopitelná a konfigurovatelná, nejčastěji využívána ke sběru dat a následné predikci chování. Další výhodou FFNN je zvyšující se prediktivní přesnost s rostoucím počtem experimentů, které následně slouží jako další vstupní data simulace a z tohoto důvodu je vhodná pro diagnostiku elektrických sítí.



Obr. 2.2: Model neuronové sítě [10]

2.2.1 Vstupní data FFNN

Aby bylo možné realizovat simulace a diagnostiku, musí být neuronová síť nejprve naučena parametřům sítě. Tyto parametry jsou ve většině případů získány za pomoci testů, dat ze servisních zásahů a informací, které jsou již známy z předchozích problémů dané elektrické sítě [11].

- Topologie sítě – parametr, který určuje strukturu a rozvětvenost zkoumaného elektrického vedení a vzdálenosti mezi sousedními body.
- Kanál – zkoumané frekvenční pásmo.
- Degradace vedení – parametr, který definuje stárnutí kabelu včetně izolace. Za pomoci testů se simuluje stárnutí a vliv vlhkosti na daný vodič.
- Pořadí úloh učení – nastavení pořadí jednotlivých učebních kroků, v jakém pořadí a jakým způsobem budou předána FFNN.

2.2.2 Výsledky FFNN

Výsledkem diagnostiky zkoumané elektrické sítě by měla být skupina výsledků, která pomůže identifikovat problém sítě a klasifikovat i možná rizika. Tento výsledek následně budou základem k servisnímu zásahu na dané elektrické trase [11].

- Typ degradace – o jaký typ degradace se jedná (koroze, narušení izolace apod) a umístění (v které žíle více-žilového vodiče, izolace a jiné).
- Místo degradace – přesné místo na eklektické trase.
- Predikce poruch – stupeň závažnosti a možné poruchy, které mohou vzniknou v důsledku daného poškození.
- Nové znalosti FFNN – výsledek diagnostiky bude následně využit k dalšímu strojovému učení neuronové sítě.

3 Fyzické parametry a topologie distribuční sítě

Největší předností PLC komunikace je využití stávající, již existující infrastruktury, nevzniká proto potřeba budování nové elektrické trasy. Daná infrastruktura však v mnoha případech byla vybudována před desítkami let, v některých případech i před rokem 1990. Stejně jako všechny materiály, tak i elektrická distribuční síť podléhá fyzickým vlivům, které degradují použité materiály, tím zvyšují chybovost a snižují účinnost přenosové sítě. Tato práce se omezí na fyzické prvky sítě, jako jsou například spojky, koncovky, kabely, které se využívají v české distribuční síti.

3.1 Vzdálenost opakovaců

Topologie má značný vliv na komunikaci pomoci po silnoproudém vedení, zvyšující se vzdáleností roste útlum vedení a zhoršuje se kvalita přenášeného signálu. Na základě měření je možné definovat limitující vzdálenosti mezi dvěma sousedními DTS 1200 m [12]. Na větší vzdálenosti nemusí být komunikace navázána a provedena.

3.2 Typ kabelu

Kabely jsou základním prvkem elektrické sítě, zajišťují propojení jednotlivých prvků sítě jako jsou například trafostanice, elektrické zdroje a samozřejmě i připojení koncových zákazníků. Kabely vysokého napětí se v zastavěných oblastech nejčastěji umísťují do země, ve většině případů do hloubky 80 cm. Je to tak dáno i zákonem, avšak je možné se stále setkat i s nadzemním elektrickým vedením. Nadzemní vedení má širší ochranné pásmo z důvodu bezpečnosti, naproti tomu má vyšší životnost a nižší náklady na výstavbu [13].

Kabely vysokého napětí je možné rozdělit na dva základní typy z hlediska použité izolace. Konstruktivně starším typem kabelu je PILC (Paper insulated lead covered) s papírovou izolací napuštěnou olejem. Naproti tomu novějším typem jsou kabely s izolací ze zesíťovaného polyetylénu, označovaný jako XLPE (Cross-linked polyethylene). XLPE postupně nahrazuje starší kabely PILC [14]. Na napěťové hladině 3 a 6 kV je možné se rovněž setkat s kabely izolovanými za pomoci PVC (polyvinylchlorid), případně PE (polyetylen), anebo i s kabely, které mají izolaci kombinovanou, tedy jak z PVC, tak i z PE.

3.2.1 PILC kabely

Na starších kabelových trasách, se v některých případech stále vyskytují vysokonapětové kabely PILC. Na povrch jádra PILC kabelu je navíjena páska z kabelového papíru, která může dosahovat tloušťky od několika milimetrů do desítek milimetrů. Po navinutí prochází vrstva procesem sušení a následně je izolace impregnována kabelovým olejem. Tento olej ve výsledku zajistí kabelu elektrickou pevnost. Nejčastější způsob značení PILC se nachází v tabulce 3.1, složením jednotlivých parametrů je následně možné se setkat například s označením kabelu ANKTOYPV [15].

Právě impregnační olej spolu s papírem z celulózy je největší slabinou těchto kabelů. Časem olej začne vysychat čímž dochází ke snížení elektrické pevnosti látky, tedy zhoršení izolačních a přenosových vlastností kabelu. Další nevýhodou PILC kabelu je jeho vyšší hmotnost z důvodu opláštění kabelu olověnou vrstvou, to má za následek komplikovanější výstavbu sítě. PILC kabely obecně nejsou vhodné pro PLC přenosy a to hlavně z důvodu jejich vyššího tlumení a nižší rychlosti šíření signálu (60–80 m/μs) [16].

Jádro	A	hliníkové
	C	měděné
Izolace	N	napuštěný papír - migrující impregnat
	M	napuštěný papír - nemigrující impregnat
	Y	měkčenný PVC
	G	kaučukový vulkanizát
	E	polyethylen
Kabel	K	silnoprůdný kabel
Plášť	A	hliník
	O	olovo
	Q	slitina olova (legované olovo)
	Y	měkčenný PVC
	U	vulkanizát z chloroprenového kaučuku
	T	samostatné opláštění žíly
	J	asfaltem napuštěná tkanina
Obaly nad pláštěm	V	vláknitý asfaltový obal
	B	asfaltem napuštěná tkanina a dva nebo tři pásy z měkčeného PVC
	Y	souvislý bezešvý obal z měkčeného PVC
	P	pancíř z dvou pásů včetně asfaltem napuštěné tkaniny
	D	pancíř z drátů včetně asfaltem napuštěné tkaniny
	Z	pancíř z nemagnetických drátů (pro jednožilové kabely na střídavý proud)

Tab. 3.1: Tvorba písmen značení na kabelu PILC [17]

3.2.2 XLPE kabely

V dnešní době se již budují trasy vysokého elektrického napětí s kabely XLPE – jedná se o kabel se zesítněným polyetylenem, který je variantou lineárního polyetylenu LPE (Linked polyethylene). XLPE kabely oproti LPE kabelům vynikají lepšími mechanickými vlastnostmi při vyšším teplotním zatížení, běžně v pracovních teplotách až do výše 90°C [15]. Zesítnění LPE je možné dosáhnout dvěma technologiemi, první technologií je ozáření elektronovým paprskem. Druhou technologií je extruze, při které se nanáší vrstva LPE a následně se tlakem zahřívá s přidanými peroxidy. Tímto procesem následně dochází k požadovanému zesítnění. Značení XLPE se nachází v tabulce 3.2, v české distribuční síti se nejčastěji nachází kabely s označením AXEKVCE a NA2XSY.

XLPE kabely vynikají vyšší elektrickou pevností, tepelnou odolností a menšími dialektickými ztrátami. Nevýhodou PILC kabelů je nemožnost instalace kabelů do svislých pozic z důvodu možného stečení impregnačního oleje, naproti tomu XLPE kabel tuto slabinu nemá a je možná jeho instalace i ve vertikálním směru.

Jádro	A	hliníkové vícedrátové
	C	měděné vícedrátové
	AV	hliníkové vodotěsné
	CV	měděné vodotěsné
Izolace	XE	zesítněný polyethylen
Kabel	K	silnoproudý kabel
Stínění	C	měděné kovové stínění
	VC	měděné kovové stínění s ochranou proti axiálnímu šíření vody pod pláštěm
Kabel typu AIRBAG	(AR)	ochranná vrstva pod pláštěm s ochranou proti mechanickému poškození
Plášť	Y	PVC plášť
	E	plášť z PE
	ER	plášť PE retardovaný proti ohni
	EER	plášť PE + PE retardovaný proti ohni
	EY	kombinovaný plášť PE+PVC
	VE	vodotěsný plášť s Al folií
Závěsný kabel	OY	olověný plášť s PVC ochranou vrstvou
	z	za posledním písmenem značky

Tab. 3.2: Tvorba písmen značení na kabelu XLPE [19]

Pro představu nejběžnější silnoproudý kabel AXEKVCEY je hliníkový více já-

drový s izolací, stíněním, vodoodpudivou vrstvou a dalšími vrstvami z kombinace PE a PVC.

V 3.3 je porovnání jednotlivých vysokonapěťových kabelů z hlediska izolační schopnosti. Nejnižší izolační vlastnosti mají kabely s impregnačním papírem, tento typ kabelů proto není vhodný pro PLC technologii. Následují kabely s PE, PVC, případně kombinací obou. Tyto typy jsou už vhodnější k PLC komunikaci. Jako nejvhodnější ke komunikaci PLC se však jeví kabely XLPE.

Materiál	Impr. papír	PVC	LPE	XLPE
E_p [kV/mm]	80	40–50	22–27	22
ρ [$\Omega \cdot cm$]	10^{18}	10^{15}	10^{10}	10^{18}
$\tan\delta$ [–]	$3 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$
ε_r [–]	2,7–3,7	3,4	2,2–2,3	2,3
T_T [°C]	85	70	70	90
T_P [°C]	120	90	110	130
T_Z [°C]	160–220	135	150	250

Tab. 3.3: Izolační materiály kabelových vedení [15]

3.3 Stáří kabelu

Jak již bylo zmíněno, životnost elektrického vedení se může výrazně lišit a to hlavně vzhledem k umístění (nadzemní/podzemní), tak i vzhledem ke geografickým vlastnostem prostředí. Životnost kabelu bude jiná v suchém, nebo vlhkém prostředí, stejně jako bude jiná v oblastech s konstantní teplotou, než v oblastech s vysokými teplotními výkyvy. V mírném prostředí, do kterého spadá i Česká republika, se v případě nadzemního vedení udává předpokládaná životnost mezi 40 a 60 lety, naproti tomu u zemních vedení je tato životnost poloviční a to řádově od 25 do 35 let [13]. Velká část české elektrické distribuční sítě byla vybudována ještě v minulém století, některá vedení jsou často i čtyřicet let stará, často tedy na hranici své životnosti.

Nejporuchovější jsou kabely instalované před více než 30-ti lety, naproti tomu u kabelů mladších 10 let se nevyskytuje téměř žádná poruchovost [14].

3.4 Kabelové soubory

Některé koncové body elektrické trasy jsou od sebe výrazně vzdáleny a není možné je propojit na přímo jedním kabelem. To hlavně jak z důvodu vysokého útlumu, tak

i z jiných technických a stavebních omezení. Takové kabelové trasy jsou proto propojeny soustavou jednotlivých kabelů, které musí být nějakým způsobem navzájem propojeny. K tomuto propojení slouží různé spojky a koncovky. Koncovky se nachází na konci elektrické trasy a propojují ji například s VN rozvaděčem, nebo transformátorem [15]. Sestava kabelů, spojek a koncovek se nazývá tzv. kabelový soubor. Tento kabelový soubor je bezpochyby nejslabším článkem celé elektrické trasy.

3.4.1 Počet spojek

Spojky spojují jednotlivé kabely na trase. S rostoucím počtem spojek klesá kvalita přenášeného signálu. Často jsou spojky nesprávně zapojeny, dále vzniká riziko vzniku vlhkosti, nebo zanesení nečistoty do spojky. Dalším parametrem ovlivňující kvalitu přenosu je materiál ze kterého jsou spojky vyrobeny, stáří spojek a rok jejich instalace v síti. Množství a kvalita spojek je významným parametrem, který určuje zda daná trasa bude vhodná, nebo nevhodná k PLC komunikaci [12].

3.4.2 Typ spojky

Typ spojky, která propojuje dvě vedení hraje rovněž významnou roli při analýze elektrické trasy. Její špatná instalace může ovlivnit životnost celého vedení. Do místa, ve kterém se nachází špatně instalována spojka, může vniknout vlhkost a další nečistoty, které negativně ovlivní funkčnost a efektivnost dané elektrické trasy.

V dřívějších dobách se stejně jako PILC kabely používaly i spojky s izolací s napaštěným papírem. Stejně jako se opouští od PILC kabelů, tak i kabelové spojky dosáhly výrazných změn. Hlavním rysem současných spojek je rychlá montáž, spolehlivější spojení a vyšší odolnost vůči vnějším vlivům jakým může být například vlhkost. Nejméně poruchové spojky jsou XLPE, následují PILC spojky, naproti tomu spojky s nejvíce poruchami jsou spojky přechodové. Přechodová spojka spojuje dva typy kabelů, například PILC - XLPE [14].

3.4.3 Stáří spojky

Spojky jsou důležitým prvkem distribuční sítě. Stejně jako typ spojky má vliv na kvalitu elektrické sítě i její stáří. Do starších spojek mohou po čase pronikat nečistoty a vlhkost, která následně znehodnotí dané vedení. Výrobci deklarují životnost spojek na několik desetiletí, z tohoto důvodu je možné považovat spojky starší dvacetí let za rizikové [18], [12], [14].

3.4.4 Typ koncovky

Stejně jako spojky, tak i koncovky mají vliv na kvalitu elektrické trasy. Oproti spojkám je však jejich počet na trase výrazně menší, nejčastěji se vyskytují jen na začátku a na konci elektrické trasy. Koncovky je možné rozdělit, obdobně jako kabely a spojky, na PILC a XLPE. PILC koncovky jsou dvojího typu, prvním jsou epoxidové, navinované na PILC kabelech a druhým typem jsou PILC koncovky se zásobníky impregnačního oleje. Dle [14] nejvyšší poruchovost dosahují PILC koncovky s impregnačním olejem, následně samostatné PILC koncovky. Naproti tomu poruchovost novějších XLPE spojek je zanedbatelná.

3.4.5 Stáří koncovky

Spojky a koncovky jsou z podobných, někdy i stejných materiálů, z tohoto důvodu je možné pokládat i koncovky starší 20-ti let za rizikové.

3.5 Návrh modelu technického stavu vedení

Fyzické parametry a topologie mají značný vliv na kvalitu přenášeného systému. Než se vůbec začne uvažovat o instalaci některého z PLC systémů, je nutné důkladně analyzovat fyzický stav dané trasy s ohledem na technický stav a stáří daného vedení.

Distributoři elektrické energie se snaží eliminovat chyby sítě a to i za použití PLC systémů. Jakýkoliv výpadek sítě je pro distributora finančně náročný a v některých zemích je i výpadek elektrické energie u koncových zákazníků sankcionován. Vzniká tak potřeba sledovat nejdůležitější parametry které ovlivňují kvalitu sítě, kontrolovat kvalitu vedení a předcházet nechtěným výpadkům sítě.

V současné době se kvalita elektrického vedení řadí do tří kategorií:

1. Vedení je provozuschopné.
2. Vedení je provozuschopné s nízkým rizikem.
3. Vedení je provozuschopné s vysokým rizikem.

Výše popsané rozdělení je v současné době již nedostatečné a málo detailní, z toho plyne špatný odhad skutečného stavu vedení. Jelikož fyzických parametrů majících vliv na kvalitu elektrického vedení je celá řada, byly vybrány nejrizikovější a ty pak byly zahrnuty jako vstupní parametry do níže popsaného modelu technického stavu vedení. Následující model fyzického stavu vedení (MFSV) dokáže prediktivně určit jestli je analyzovaná trasa z pohledu fyzického stavu vhodná ke komunikaci PLC.

3.5.1 Rozpis jednotlivých parametrů

Model technického stavu vedení se sestává z osmi parametrů. Prvním parametrem je topologický parametr vzájemná vzdálenost jednotlivých distribučních trafostanic. Poté následují parametry fyzického stavu vedení.

Vzdálenost bez opakovaců

Rozmezí efektivní vzdálenosti mezi trafostanicemi bez použití opakovaců může nabývat hodnoty 1–1200 metrů [12].

$$\text{Vzdálenost bez opakovaců} = \frac{0,2 \cdot 50}{\text{vzdálenost}} \quad (3.1)$$

Typ kabelu

Parametr je rozdělen na tři typy vysokonapěťových kabelů z hlediska izolace.

Kabel PILC s izolací z impregnačního papíru = 0

Kabel s izolací z PE, PVC, nebo kombinací obou = 0,10

Kabel XLPE se zesítněným polyetylenem = 0,20

Stáří kabelu

Model uvažuje pouze zemní vysokonapěťové trasy. U nadzemních by se parametr nacházel v jiných hodnotách, jelikož jak bylo uvedeno, u nadzemního vedení je životnost řádově jednou vyšší.

$$\textit{Stáří kabelu 31 let a více} = 0$$

$$\textit{Stáří kabelu 11 – 30 let včetně} = 0,05$$

$$\textit{Stáří kabelu do 10 let} = 0,10$$

Počet spojek

Pokud daná trasa neobsahuje žádnou spojku, parametr bude nabývat svého maxima, tedy hodnoty 0,20. Se vzrůstajícím počtem spojek parametr klesá, od 20. spojky je již parametry na hodnotě 0.

$$\textit{Počet spojek} = \frac{0,198 \cdot 1}{\textit{počet spojek}} \quad (3.2)$$

Typ spojky

Typ spojky je rozdělen na XLPE, PILC a na přechodovou spojku. Spojka přechodová v tomto případě znamená přechod mezi XLPE - PILC, případně PILC - XLPE. Přechodové spojky jsou nejméně spolehlivé.

$$\textit{Přechodová spojka} = 0$$

$$\textit{PILC spojka} = 0,05$$

$$\textit{XLPE spojka} = 0,10$$

Stáří spojky

Hranice spolehlivosti spojek byla stanovena na 20 let, u starších spojek poruchovost výrazně narůstá.

$$\textit{Stáří spojky 21 let a více} = 0$$

$$\textit{Stáří spojky do 20 let} = 0,10$$

Typ koncovky

Koncovky mají z hlediska zastoupení v modelu nižší váhu, předpokládá se, že trasa obsahuje menší počet koncovek, než spojek. Spolehlivost koncovek je rovněž vyšší, než samotných spojek [14].

$$\textit{PILC koncovka} = 0$$

$$\textit{XLPE koncovka} = 0,05$$

Stáří koncovky

Koncovky obecně jsou vyrobeny z podobných materiálů jako spojky, z tohoto důvodu byla mezní hodnota spolehlivosti stanovena rovněž na 20 let.

Stáří koncovky 21 let a více = 0

Stáří koncovky do 20 let = 0,05

Hodnota koeficientu

Koeficient hodnotí technický stav z hlediska fyzických parametrů, je to první indikátor, který určuje zda je možné uvažovat o PLC komunikaci na dané trase. Koeficient nabývá hodnot od 0 do 1, jako součet jednotlivých fyzických parametrů vedení 3.4. Hodnota menší než 0,5 vyjadřuje, že daná trasa je nevhodná pro komunikaci PLC a hodnota vyšší než 0,5, že je možné uvažovat o využití PLC technologie na daném úseku. V případě hodnoty vyšší než 0,5 se proto navrhuje danou trasu otestovat a proměřit parametry sítě za pomoci PLC a vypočítat koeficient KTS (Koeficient Technického Stavů) [12]. Koeficient zohledňuje v hodnocení technického stavu trasy i přenosovou rychlost, parametr BLE (Bit Load Estimate), SNR (Signal to noise ratio), které dokáže PLC modem měřit.

Parametr	Podíl	Rozsah hodnot	Interval
Vzdálenost bez opakovaců [m]	20 %	0 – 1200	0 – 0,20
Typ kabelu	20 %	0, 1 nebo 2	0 – 0,20
Stáří kabelu	10 %	0, 1 nebo 2	0 – 0,10
Počet spojek	20 %	0 až 20	0 – 0,20
Typ spojky	10 %	0, 1 nebo 2	0 – 0,10
Stáří spojky	10 %	0 nebo 1	0 nebo 0,10
Typ koncovky	5 %	0 nebo 1	0 nebo 0,05
Stáří koncovky	5 %	0 nebo 1	0 nebo 0,05

Tab. 3.4: Jednotlivé koeficienty modelu technického stavu vedení

3.5.2 Příklad výpočtu

K výpočtu poslouží reálný úsek distribuční sítě v Brně.

DTS1 - DTS2

Vzdálenost: 507 m

Typ kabelu: AXEKVCEY

Stáří kabelu: 1983, 1990, 1990, 2003, 1990

Počet spojek: 4

Typ spojky: POLJ

Stáří spojky: 2006, 2006, 2004, 2004

Typ koncovky: HIT1

Stáří koncovky: 2004

Na vzorovém úseku se nachází 5 kabelů stejného typu AXEKVCEY, avšak instalovaných v různých časových obdobích. Do koeficientu se vždy započítává nejstarší hodnota, v tomto případě tedy rok výstavby 1983. Stejně je tomu i v případě instalovaných spojek, nejstarší je z roku 2004. Výpočet jednotlivých parametrů je v následující tabulce 3.5.

Parametr	Výpočet	Hodnota
Vzdálenost bez opakovačů (m)	$Výpočet = \frac{0,2 \cdot 50}{507}$	0,0197
Typ kabelu	$AXEKVCEY = XLPE$	0,20
Stáří kabelu	$1983 = starší než 31 let$	0
Počet spojek	$Výpočet = \frac{0,198 \cdot 1}{4}$	0,0495
Typ spojky	$POJL = XLPE$	0,10
Stáří spojky	$2004 = mladší než 20 let$	0,10
Typ koncovky	$HIT1 = XLPE$	0,05
Stáří koncovky	$2004 = mladší než 20 let$	0,05
Celkem		0,5692

Tab. 3.5: Vzorový výpočet koeficientu

Výsledný koeficient fyzického stavu vedení je 0,5692 – měřený úsek je možné považovat za relativně vhodný pro PLC komunikaci a doporučuje se provést zkušební testování dané trasy.

4 Měření

Měření bylo provedeno na reálné síti v domácnosti v bytové jednotce. Bytová jednotka se sestává ze dvou okruhů elektrické sítě. První okruh se nazývá *Pokoje*, druhým okruhem je *Kuchyň a koupelna*. V bytě se nachází rozvaděč od kterého vede standardní kabeláž typu *CYKY – J 3x2,5mm²* k jednotlivým zásuvkám, tedy bodům měření. Jedním z výsledků měření je i topologie sítě, vytvořená z výsledků a analýzy naměřených dat.

Měření se skládá ze dvou částí. V první části byla měřena přenosová rychlost k jednotlivým bodům sítě v elektrického okruhu *Pokoje* protokolem TCP. V druhé části byla změřena přenosová rychlost s využitím protokolů TCP i UDP k nejbližšímu bodu elektrické sítě navíc s 50 metrovým prodlužovacím kabelem.

V obou částech měření byly porovnány čtyři dvojice rozdílných PLC síťových adaptérů. Jejich technické parametry se jsou v tabulce 4.1.

1. Comfast CF-WP200M
2. Zyxel PLA5206
3. Cisco PLE500
4. Devolo Magic 2

Výrobce	Comfast	Zyxel	Cisco	Devolo
Model	CF-200M	PLA5206	PLE500	Magic 2
Chipset	QCA6410	BVM60333	QCA7450	88LX5152
Standard	HP AV	HP AV2	HP AV2	G.hn
Šířka pásma [MHz]	–	2–86	2–68	2–100
PHY rychlost [Mbit/s]	200	1000	600	2400
ETH rozhraní [Mbit/s]	200	1000	1000	1000
Zabezpečení	128b AES	128b AES	128b AES	128b AES

Tab. 4.1: Technická data použitých zařízení

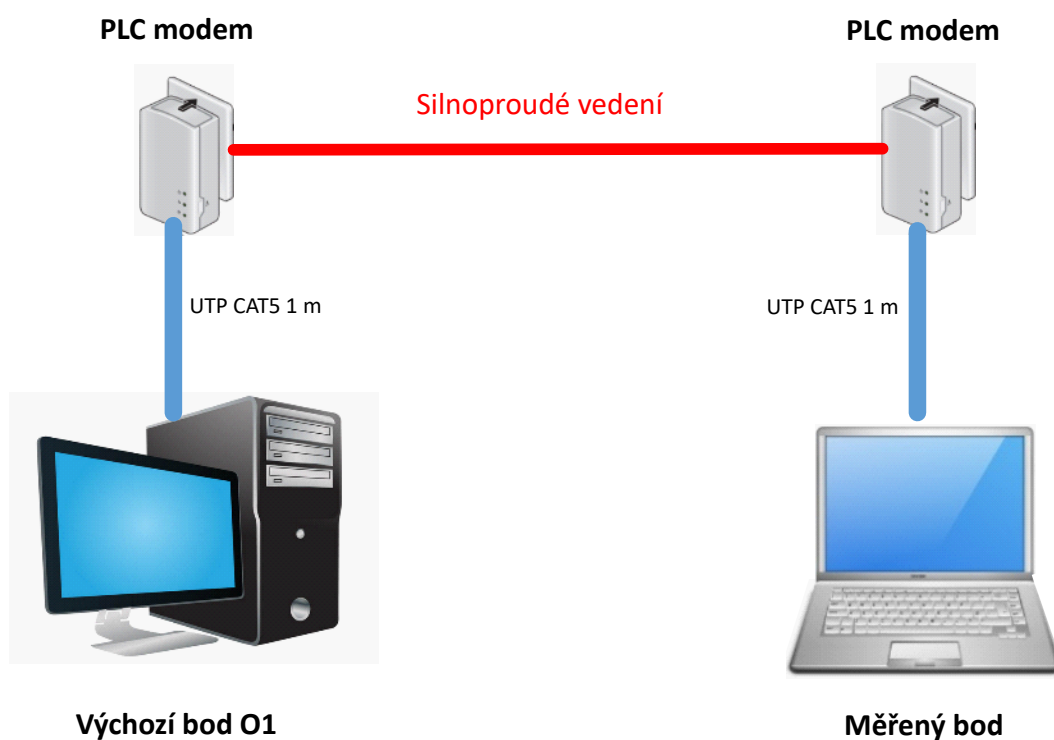
4.1 Měření propustnost sítě k jednotlivým bodům

4.1.1 Metodika měření

Měření se uskutečnilo v okruhu *Pokoje* - tento okruh zahrnuje body sítě, u kterých se předpokládá možné budoucí využití PLC komunikace (síťová televize, další stolní počítač). Zmíněný okruh se sestává ze tří pokojů označených jako obývací pokoj, pokoj a ložnice. V ložnici se nachází dvojice zásuvek elektrické sítě, které jsou označeny jako L1 a L2. V pokoji a obývacím pokoji jsou tři zásuvky označeny P1–P3

a O1–O2. Druhý okruh *Kuchyň a koupelna* nebyl k měření využit, není zde v budoucnu předpoklad připojení zařízení pomocí komunikace po silnoproudém vedení. V případě potřeby připojení síťových zařízení v kuchyni a koupelně by byla preferována varianta přístupové Wi-fi sítě. Na základě naměřených dat byl vypracován půdorys se silnoproudou sítí bytové jednotky, který je k dispozici v příloze A.1.

K měření byl použit stolní počítač s operačním systémem Windows 10 Pro, který zároveň představoval server. Dále pak přenosný notebook Lenovo G50–30, ten sloužil jako klient. U zásuvky obývacího pokoje O1 v budoucnu bude instalován router poskytovatele internetového připojení, tento bod byl tedy vyhodnocen jako výchozí. Od tohoto bodu byly následně měřeny síťové parametry k ostatním bodům okruhu. V bodě O1 byl stolní PC (server). S notebookem–klientem byly proměřeny všechny body v pokojích s využitím metrového síťového kabelu *UTP RJ45 CAT5e* – schéma zapojení je názorně zobrazeno v 4.1. K měření přenosové rychlosti byl použit software IPerf 3.1.3.



Obr. 4.1: Schéma zapojení měření propustnosti sítě bytové jednotky.

Parametry měření

1. Propustnost sítě Mbit/s
2. Měřena vrstva TCP

3. Doba měření 20 sekund
4. Tři měření na každém bodě s každým adaptérem

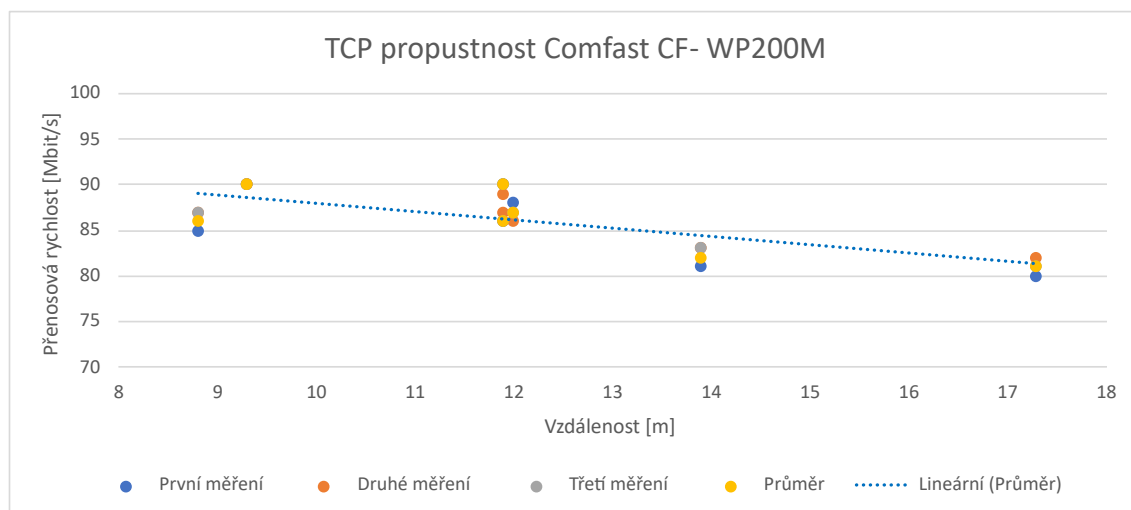
Měření modemem Comfast

Síťový PLC adaptér Comfast CF-WP200M je modem pro domácí použití, který, jak název napovídá, pracuje s maximální přenosovou rychlostí 200 Mbit/s [20]. Tato rychlost je stejně jako u ostatních PLC modemů závislá na kvalitě silnoproudého vedení a vzdálenosti.

Měření propustnosti za pomoci modemu Comfast bylo provedeno jako první, v tabulce 4.2 jsou naměřená data. Na obrázku 4.2 je vidět téměř konstantní průběh přenosové rychlosti ke všem bodům sítě, který je v rozmezí 80–90 Mbit/s.

Bod	Vzdálenost [m]	První měření [Mbit/s]	Druhé měření [Mbit/s]	Třetí měření [Mbit/s]	Průměr [Mbit/s]
O1 – P2	8,8	85	87	87	86
O1 – O2	9,3	90	90	90	90
O1 – O3	11,9	90	89	90	90
O1 – P1	11,9	86	87	86	86
O1 – L2	12	88	86	87	87
O1 – P3	13,9	81	83	83	82
O1 – L1	17,3	80	82	81	81

Tab. 4.2: TCP propustnost Comfast CF-WP200M



Obr. 4.2: Závislost přenosové rychlosti na vzdálenosti modemu Comfast CF-W200M.

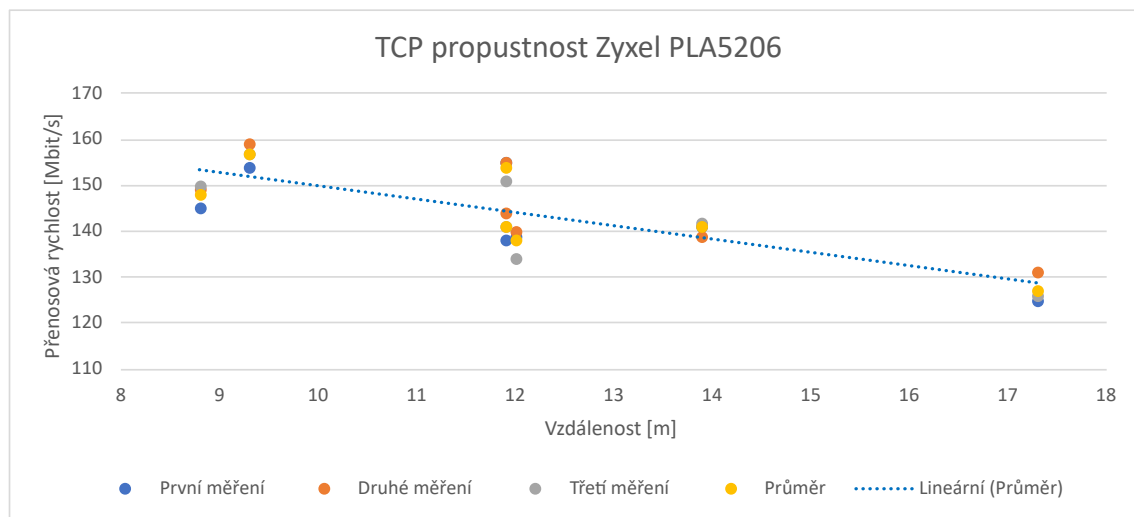
Měření modemem Zyxel

Zyxel PLA5206 je síťový adaptér pro gigabitový Ethernet, výhodou je vyšší přenosová rychlost oproti adaptéru Comfast. Gigabitové rychlosti je možné dosáhnout pouze za pomoci technologie HomePlug AV2 v kompatibilitě s ostatními zařízeními s touto technologií. Měřená síť touto technologií nedisponuje. Zařízení vysílá v frekvenční šířce od 2 MHz do 86 MHz a deklarovaná maximální vzdálenost komunikace je 300 metrů [21].

Jak názorně zobrazuje tabulka 4.3 a výsledný průběh 4.3, přenosová rychlost byla oproti modemu Comfast v průměru o 50 Mbit/s vyšší, avšak je zde i znatelnější pokles rychlosti se vzrůstající vzdáleností.

Bod	Vzdálenost [m]	První měření [Mbit/s]	Druhé měření [Mbit/s]	Třetí měření [Mbit/s]	Průměr [Mbit/s]
O1 – P2	8,8	145	149	150	148
O1 – O2	9,3	154	159	157	157
O1 – O3	11,9	155	155	151	154
O1 – P1	11,9	138	144	141	141
O1 – L2	12	139	140	134	138
O1 – P3	13,9	141	139	142	141
O1 – L1	17,3	125	131	126	127

Tab. 4.3: TCP propustnost Zyxel PLA5206.



Obr. 4.3: Závislost přenosové rychlosti na vzdálenosti modemu Zyxel PLA5206.

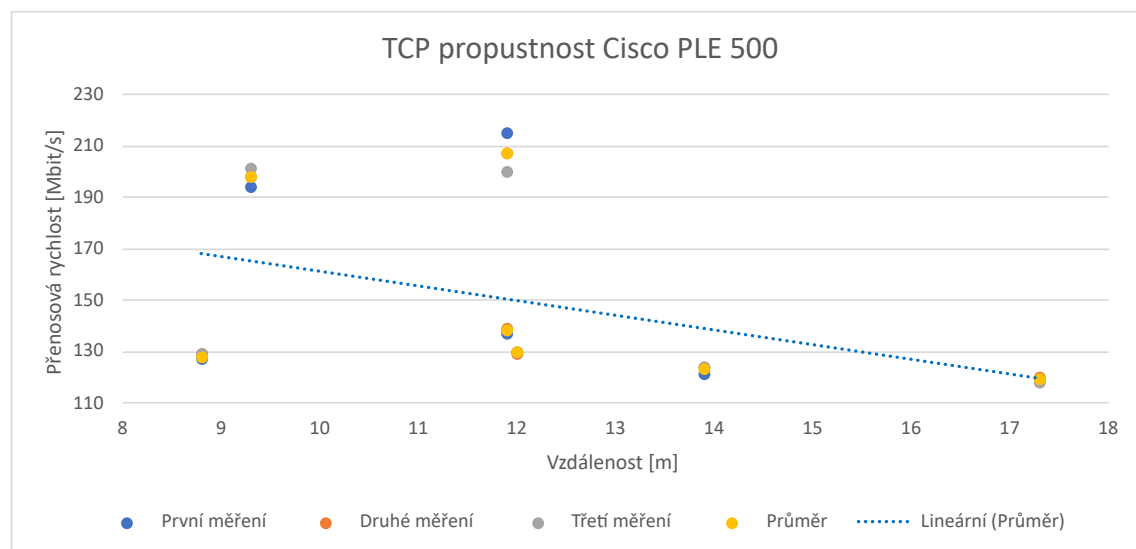
Měření modemem Cisco

Následovalo měření zařízením Cisco Linksys PLE500. Tento PLC modem podporuje, stejně jako předchozí modem Zyxel, standard HomePlug AV a HomePlug AV2. Zařízení je vybaveno jedním RJ-45 portem a je tedy určeno především pro domácí použití. Narozdíl od gigabitové rychlosti modemu Zyxel, zařízení od společnosti Cisco dosahuje poloviční rychlosti, tedy do 600 Mbit/s. Stejně jako v předchozím případě je tato rychlost podmíněna splněním podmínek standardu HomePlug [22].

Naměřené výsledky jsou v tabulce 4.4 a jejich grafický průběh na obrázku 4.4.

Bod	Vzdálenost [m]	První měření [Mbit/s]	Druhé měření [Mbit/s]	Třetí měření [Mbit/s]	Průměr [Mbit/s]
O1 – P2	8,8	127	129	129	128
O1 – O2	9,3	194	198	201	198
O1 – O3	11,9	215	207	200	207
O1 – P1	11,9	137	139	138	138
O1 – L2	12	130	129	130	130
O1 – P3	13,9	121	124	124	123
O1 – L1	17,3	119	120	118	119

Tab. 4.4: TCP propustnost Cisco PLE500.



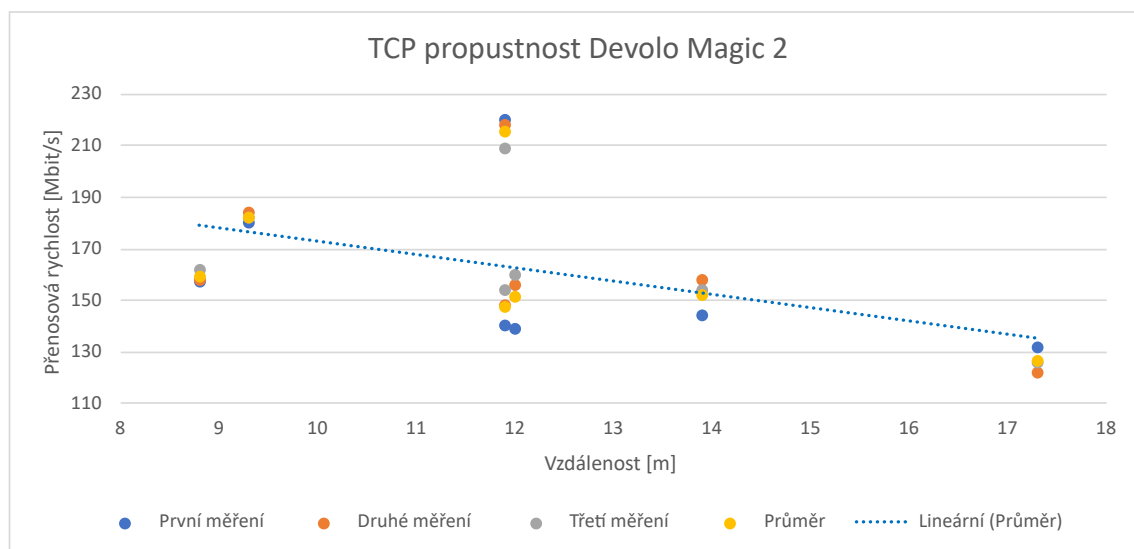
Obr. 4.4: Závislost přenosové rychlosti na vzdálenosti modemu Cisco PLE500.

Měření modemem Devolo

Modem Devolo, oproti ostatním použitým modemům, podporuje i dvoupásmovou Wi-Fi (2,4 a 5 GHz), disponuje přenosovou rychlostí až 2400 Mbit/s a je vybaven dvěma gigabitovými LAN porty. Výrobce deklaruje maximální dosah signálu PLC komunikace do vzdálenost 500 m, bez potřeby zesilovače signálu [23]. Další předností je funkce AP Steering, ta zajistí připojení k optimálnímu bodu sítě, který má nejsilnější signál. Nevýhodou je vyšší pořizovací cena, kvalita tohoto PLC modemu přesahuje potřeby běžné domácnosti. Z naměřených výsledků 4.5 a 4.5 je jasné patrné, že přenosová rychlost byla nejvyšší u tohoto zařízení. Přenosová rychlost ke všem bodům byla v rozmezí 120–220 Mbit/s.

Bod	Vzdálenost [m]	První měření [Mbit/s]	Druhé měření [Mbit/s]	Třetí měření [Mbit/s]	Průměr [Mbit/s]
O1 – P2	8,8	157	158	162	159
O1 – O2	9,3	180	184	182	182
O1 – O3	11,9	220	218	209	216
O1 – P1	11,9	140	148	154	147
O1 – L2	12	139	156	160	152
O1 – P3	13,9	144	158	154	152
O1 – L1	17,3	132	122	126	127

Tab. 4.5: TCP propustnost Devolo Magic 2.



Obr. 4.5: Závislost přenosové rychlosti na vzdálenosti modemu Devolo.

Celkové porovnání měření jednotlivých přístupových bodů

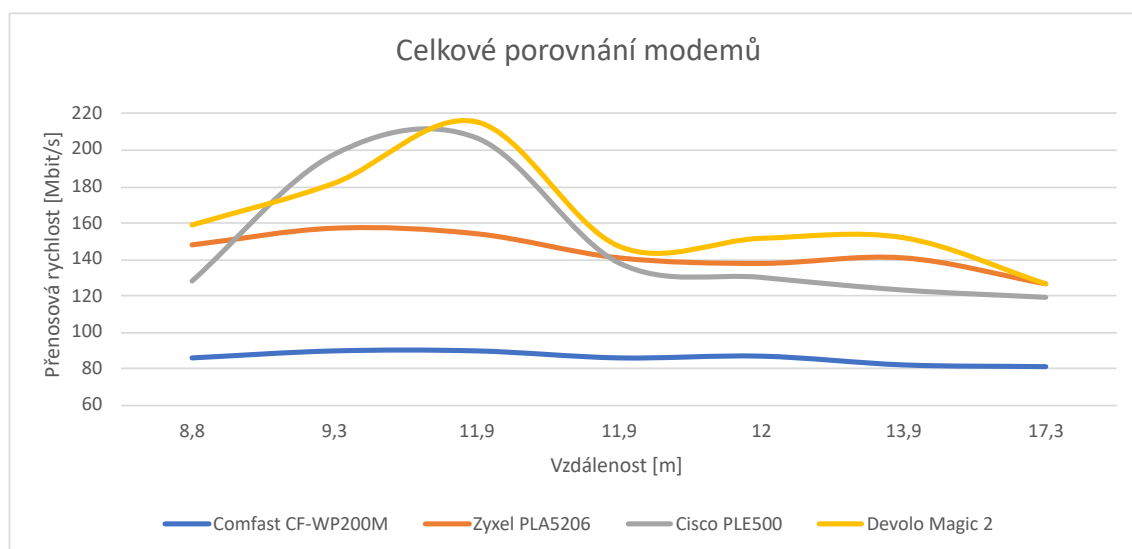
S každým PLC modemem byly provedeny celkem tři měření ke každému přístupovém bodu sítě. Průměr z těchto měření je v tabulce 4.6 a graficky znázorněn na obrázku 4.6. Z celkových výsledků je jasné patrné, že nejvyšší přenosové rychlosti dosahuje, ke všem bodům měřené sítě, modem od výrobce Devolo. Tato vyšší přenosová rychlost včetně dalších funkcí tohoto zařízení, je však vykoupena cenou. Cenový rozdíl oproti ostatním zařízením je v některých případech až trojnásobný.

V bytové jednotce je v tuto chvíli pevné internetové připojení VDSL 100 Mbit/s, maximální přenosové rychlosti by bylo dosaženo se všemi použitými modemy s výjimkou zařízením Comfast, které dosahovalo průměrné přenosové rychlosti 80 Mbit/s.

V případě přechodu na rychlejší internetové připojení 250 Mbit/s by připadalo v úvahu zařízení Cisco, Zyxel a Devolo, v případě internetového připojení 1000 Mbit/s pouze zařízení Devolo a Zyxel a to však pouze při splnění podmínek standardu HomePlug. Co se týče manipulace a robustnosti zařízení, je třeba vyzdvihnout zařízení Cisco a Devolo, obě tato zařízení disponují zástrčkou se zemnicím vodičem, lépe drží v zásuvce a snižuje se tím riziko náhodného vypojení za provozu. Zařízení Devolo navíc disponuje i vlastní zásuvkou k připojení dalšího zařízení, zásuvka je tedy volná.

Bod	Vzdálenost [m]	Comfast CF-WP200M [Mbit/s]	Zyxel PLA 5206 [Mbit/s]	Cisco PLE500 [Mbit/s]	Devolo Magic 2 [Mbit/s]
O1 – P2	8,8	86	148	128	159
O1 – O2	9,3	90	157	198	182
O1 – O3	11,9	90	154	207	216
O1 – P1	11,9	86	141	138	147
O1 – L2	12	87	138	130	152
O1 – P3	13,9	82	141	123	152
O1 – L1	17,3	81	127	119	127

Tab. 4.6: Porovnání použitých PLC modemů.



Obr. 4.6: Porovnání použitých PLC modemů.

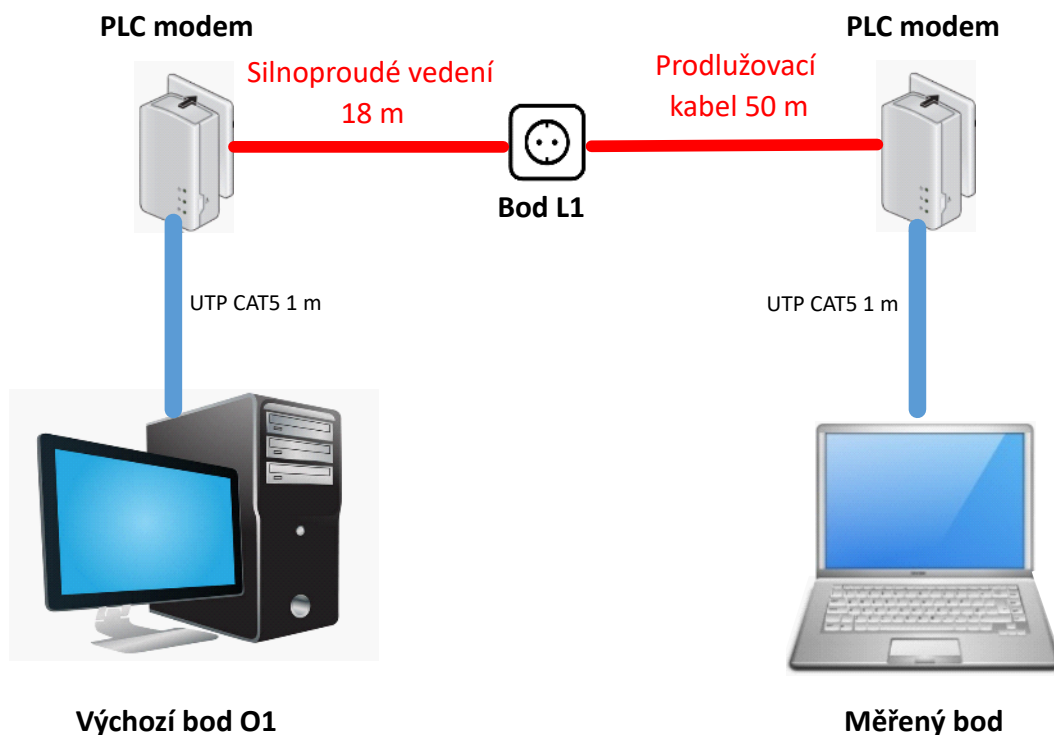
4.2 Měření propustnost sítě s prodloužením

4.2.1 Metodika měření

V druhém měření byla měřena přenosová rychlost protokolu TCP a UDP na nejvzdálenější bod sítě - bod L1. Do tohoto bodu byl následně připojen prodlužovací kabel délky 50 metrů, celkově tak měřená trasa měla 68 metrů s jedním propojovacím bodem. Měření bylo provedeno s využitím všech čtyř typů PLC modemů. Schéma zapojení je na obrázku 4.7. Stejně jako v předchozím měření i zde byl stolní počítač server a notebook byl na konci vedení jako klient. K měření byl využit opět software IPerf 3.1.3.

Parametry měření

1. Propustnost sítě Mbit/s
2. Měřena vrstva TCP a UDP
3. U protokolu UDP měřen i jitter a ztrátovost datagramů
4. Doba měření 20 sekund
5. Tři měření s každým adaptérem



Obr. 4.7: Schéma zapojení během měření propustnosti sítě.

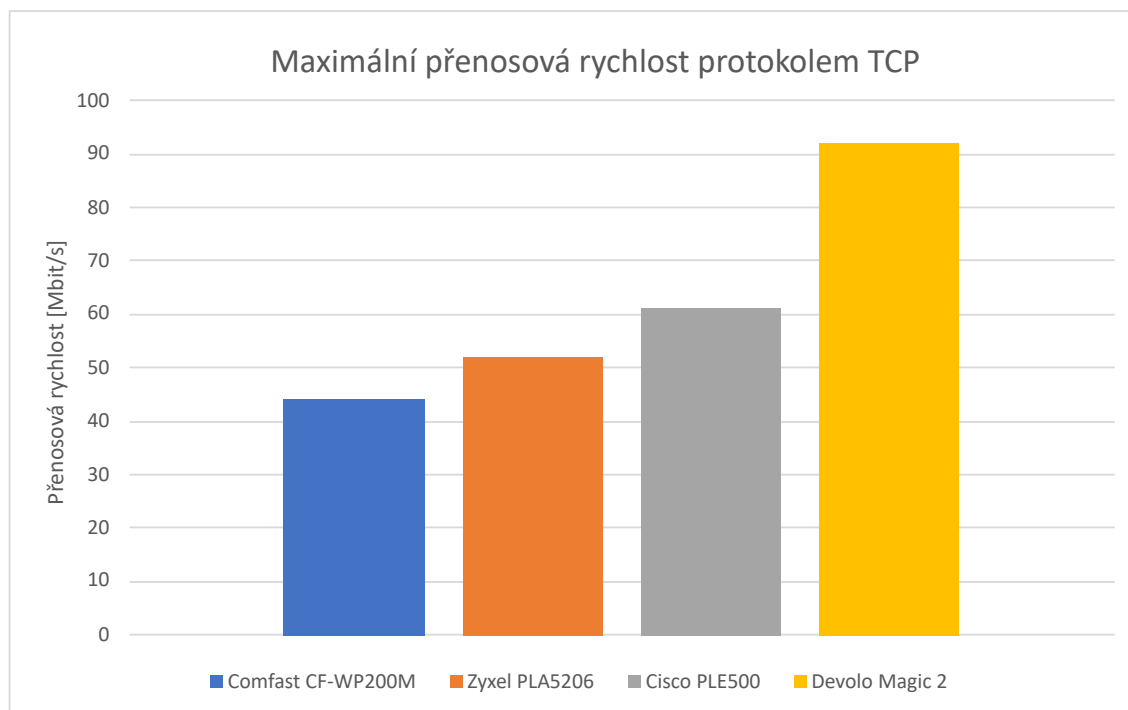
4.2.2 Měření TCP spojení

TCP je spolehlivý protokol přenosu, příchozí data se ověřují, proto by měla dorazit všechna k cíli. Ověřování samozřejmě zpomaluje datový přenos, proto se v porovnání s protokolem UDP předpokládá nižší přenosová rychlost.

Měření TCP spojení bylo provedeno se všemi čtyřmi modemy, měřila se pouze maximální přenosová rychlost 4.7. Z výsledků je patrné, že nejlepšího výsledku dosáhl modem Devolo Magic 2 s průměrnou přenosovou rychlostí 92 Mbit/s. Rozdíl v přenosových rychlostech je dobře viditelný v grafickém zobrazení 4.8, kde například oproti modemu Comfast, je naměřená rychlost skoro dvojnásobná. Nicméně celkově bylo dosaženo spolehlivé přenosové rychlosti vyšší než 40 Mbit/s se všemi zařízeními.

Měření	Comfast CF-WP200M	Zyxel PLA 5206	Cisco PLE500	Devolo Magic 2
První měření [Mbit/s]	38	53	57	88
Druhé měření [Mbit/s]	47	51	64	93
Třetí měření [Mbit/s]	48	53	62	96
Průměr [Mbit/s]	44	52	61	92

Tab. 4.7: TCP měření přenosové rychlosti.



Obr. 4.8: TCP měření maximální přenosové rychlosti.

4.2.3 Měření UDP spojení

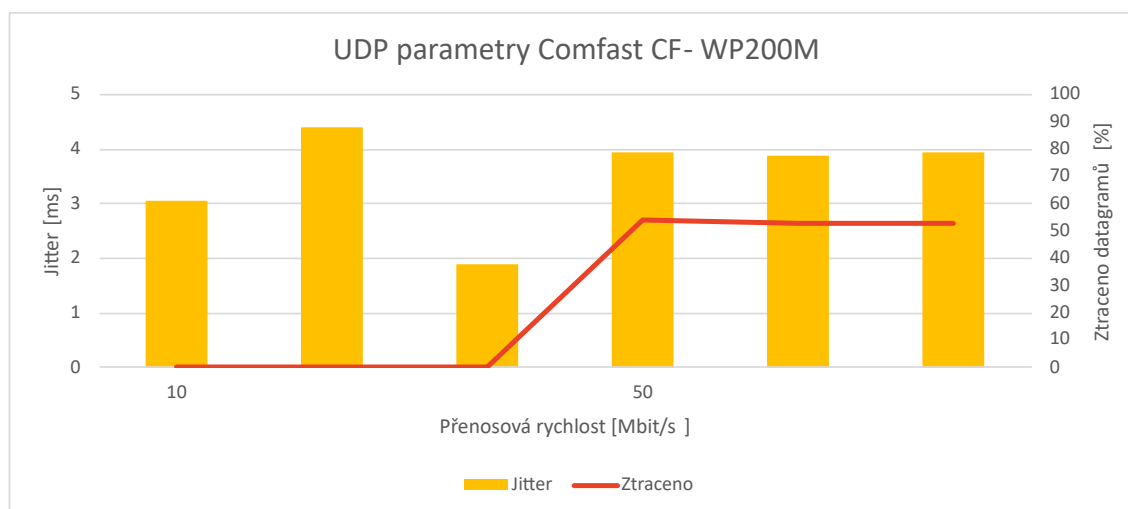
Protokol UDP neověřuje, jestli vyslaná data dorazila v pořádku ke svému cíli. V důsledku toho je přenosová rychlost obecně vyšší, avšak méně spolehlivá, než v případě protokolu TCP. Hlavním měřeným parametrem UDP měření byla přenosová rychlost. Součástí naměřených dat protokolem UDP je i počet ztracených datagramů a stabilita spojení (čas mezi po sobě přijatými datagramy), neboli jitter. U každého měření byla pevně nastavena velikost přenosové rychlosti, tedy kolik Mbit dat bude přeneseno za jednotku času – v tomto případě za jednu sekundu. Přenosové rychlosti byly stanoveny na 10, 50, 100, 150 a 200 Mbit/s. Mezní hranice pro ztrátovost dat byla 50 %, jakmile tedy zařízení přesáhlo tuto ztrátovost, vyšší přenosové rychlosti nebyly s daným zařízením měřeny. V další části byly měřeny maximální přenosové rychlosti protokolu UDP se ztrátovostí menší než 50 % – tyto výsledky jsou následně porovnány s protokolem TCP.

Měření modemem Comfast

U modemu Comfast CF-WP200M bylo dosaženo přenosové rychlosti 10 Mbit/s bez ztráty dat viz tabulka 4.8 a obrázek 4.9. Při nastavení přenosové rychlosti 100 Mbit/s byl modem schopný přenášet maximálně 60 Mbit/s avšak s 97 % ztrátovostí – toto měření tedy není zahrnuto do výsledků. Maximální přenosová rychlost se ztrátovostí dat menší než 1 % byla 45 Mbit/s.

Přenosová rychlost [Mbit/s]	Číslo měření [č.]	Jitter [ms]	Průměr [ms]	Ztraceno datagramů [%]	Průměr [%]
10	1	3,067	3,123	0	0
	2	4,410		0	
	3	1,893		0	
50	1	3,941	3,919	54	53
	2	3,882		53	
	3	3,933		53	

Tab. 4.8: UDP měření modemem Comfast.



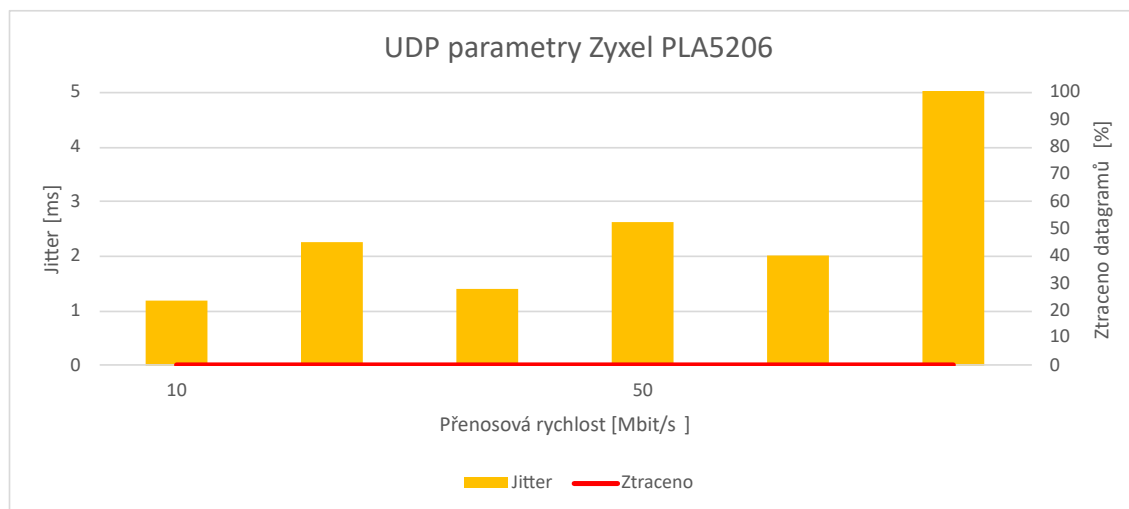
Obr. 4.9: UDP parametry Comfast.

Měření modemem Zyxel

S modemem Zyxel se dosáhlo podobné maximální přenosové rychlosti jako v případě modemu Comfast. Naproti tomu, jak je patrné v tabulce 4.9 a na obrázku 4.10, maximální naměřená přenosová rychlost vykazuje nulovou ztrátovost datagramů. Při nastavení přenosové rychlosti 100 Mbit/s dokázalo zařízení přenášet data pouze s maximální přenosovou rychlostí 60 Mbit/s. Zajímavostí je, že při dosažení maximální přenosové rychlosti 60 Mbit/s byla ztrátovost nulová – lze tedy považovat tento přenos za spolehlivý.

Přenosová rychlost [Mbit/s]	Číslo měření [č.]	Jitter [ms]	Průměr [ms]	Ztraceno datagramů [%]	Průměr [%]
10	1	1,171	1,612	0	0
	2	2,269		0	
	3	1,397		0	
50	1	2,629	3,262	0	0
	2	2,007		0	
	3	5,150		0	

Tab. 4.9: UDP měření modemem Zyxel.



Obr. 4.10: UDP parametry Zyxel.

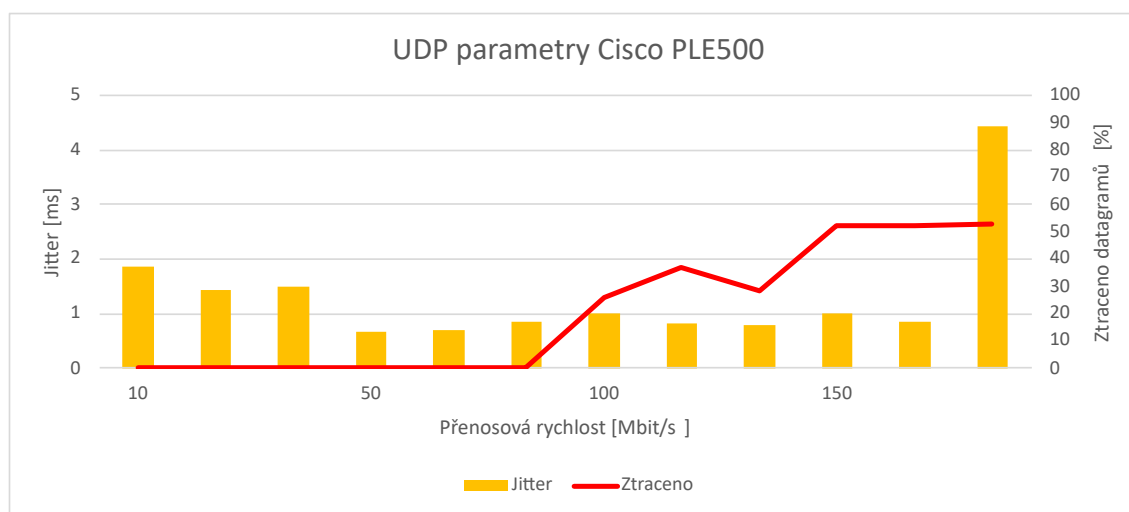
Měření modemem Cisco

Modem od společnosti Cisco byl schopný dosáhnout vyšší přenosové rychlosti a to až 150 Mbit/s avšak za cenu ztráty skoro poloviny datagramů. Přenosovou rychlostí 100 Mbit/ byla ztráta nižší, řádově každý třetí datagram nedorazil do svého cíle. Jako spolehlivou komunikaci, stejně jako v předchozím případě, je možné považovat přenosovou rychlost 50 Mbit/s viz 4.10 a 4.11. Maximální přenosová rychlost se ztrátovostí nižší než 1 % dat byla 74 Mbit/s.

Při nastavení téměř maximální přenosové rychlosti, 50 Mbit/s, je zde výrazně nižší jitter oproti zařízení Zyxel, řádově dosahuje hodnoty 0,739 ms.

Přenosová rychlost [Mbit/s]	Číslo měření [č.]	Jitter [ms]	Průměr [ms]	Ztraceno datagramů [%]	Průměr [%]
10	1	1,831	1,600	0	0
	2	1,435		0	
	3	1,503		0	
50	1	0,669	0,739	0	0
	2	0,698		0	
	3	0,851		0	
100	1	0,989	0,860	26	30
	2	0,804		37	
	3	0,787		28	
150	1	1,007	2,095	52	52
	2	0,852		52	
	3	4,427		53	

Tab. 4.10: UDP měření modemem Cisco.



Obr. 4.11: UDP parametry Cisco.

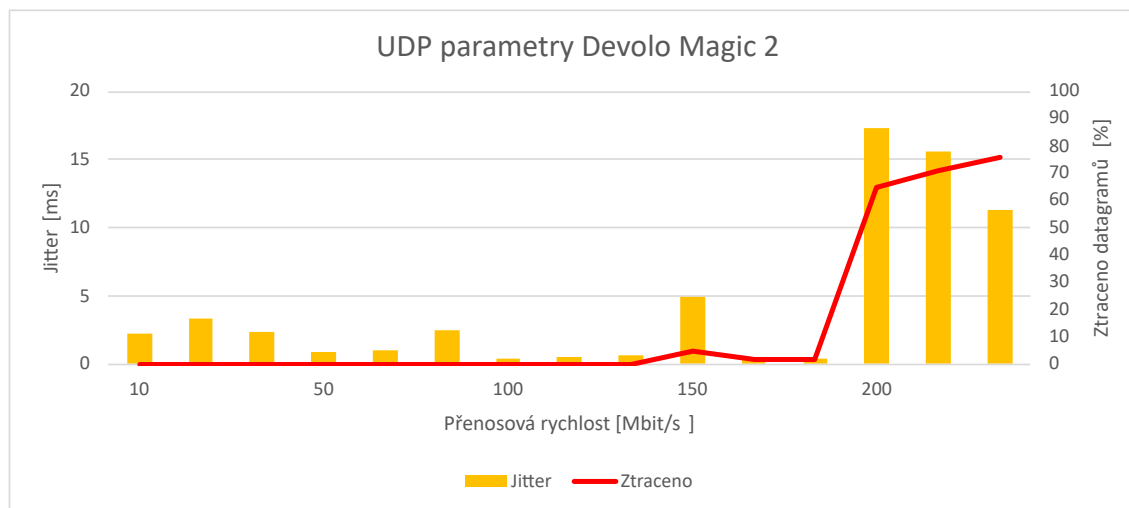
Měření modemem Devolo

Nejlepšího výsledku, stejně jako ve všech předchozích případech, dosáhlo zařízení Devolo. Toto zařízení dosahuje relativně dobré ztrátovosti, cca 3 % datagramů i při nastavené přenosové rychlosti 150 Mbit/s. Ztrátovosti nižší než 1 % dosahuje zařízení při rychlostech 116 Mbit/s. Zajímavostí je, že zařízení navázalo spojení i při nastavené přenosové rychlosti 1000 Mbit/s, tedy 1 Gbit/s, avšak ani jeden datagram nedorazil do svého cíle.

Naměřené hodnoty jsou zobrazeny v tabulce 4.11 na obrázku 4.12.

Přenosová rychlost [Mbit/s]	Číslo měření [č.]	Jitter [ms]	Průměr [ms]	Ztraceno datagramů [%]	Průměr [%]
10	1	2,225	2,672	0	0
	2	3,377		0	
	3	2,413		0	
50	1	0,906	1,471	0	0
	2	1,023		0	
	3	2,483		0	
100	1	0,451	0,526	0	0
	2	0,477		0	
	3	0,649		0	
150	1	4,889	1,921	5	3
	2	0,469		2	
	3	0,404		2	
200	1	17,276	14,743	65	71
	2	15,651		71	
	3	11,301		76	

Tab. 4.11: UDP měření modemem Devolo.

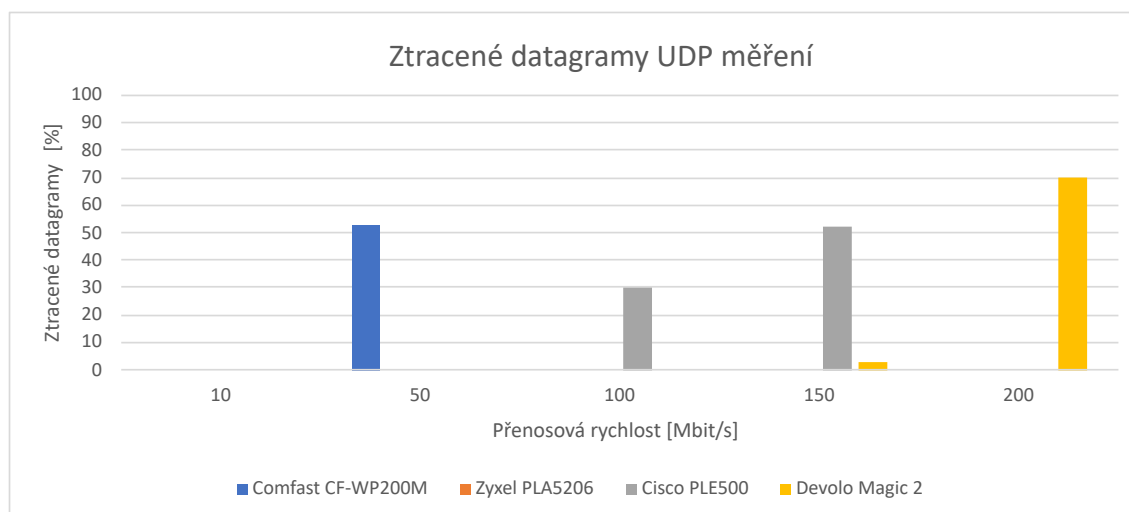


Obr. 4.12: UDP parametry Devolo.

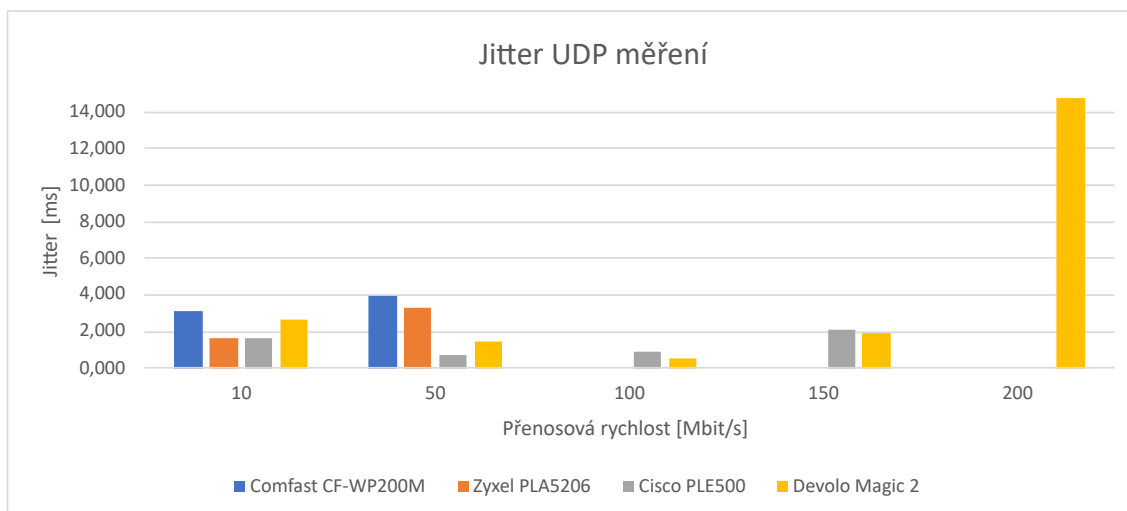
Porovnání jednotlivých modemů UDP měření

V pásmu 10 Mbit/s dosáhly všechny modemy bezztrátového přenosu avšak s narůstající přenosovou rychlostí se rapidně zvyšovala i ztrátovost. U modemu Comfast byla nastavena přenosová rychlost 100 Mbit/s, reálně však dosáhl pouze 50 Mbit/s, s více než poloviční ztrátovostí dat. Naproti tomu zařízení Zyxel, při stejné nastavené rychlosti, dosáhlo maximální rychlosti přenosu 60 Mbit/s s nulovou ztrátou datagramů. U zařízení Cisco bylo navázáno spojení i při nastavené rychlosti 150 Mbit/s, avšak s poloviční ztrátou datagramů. Jako ideální přenosová rychlost tohoto zařízení v daném zapojení se jeví 50 Mbit/s. Nejlepšího výsledku dosáhlo zařízení Devolo, které navázalo spojení i při nastavené přenosové rychlosti 1 Gbit/s, avšak s nulovým přenosem dat. Při nastavené rychlosti 150 Mbit/s byla ztrátovost ještě necelá 3 %. Za bezztrátovou přenosovou rychlost modemu Devolo v daném zapojení je možné považovat rychlosti do 116 Mbit/s.

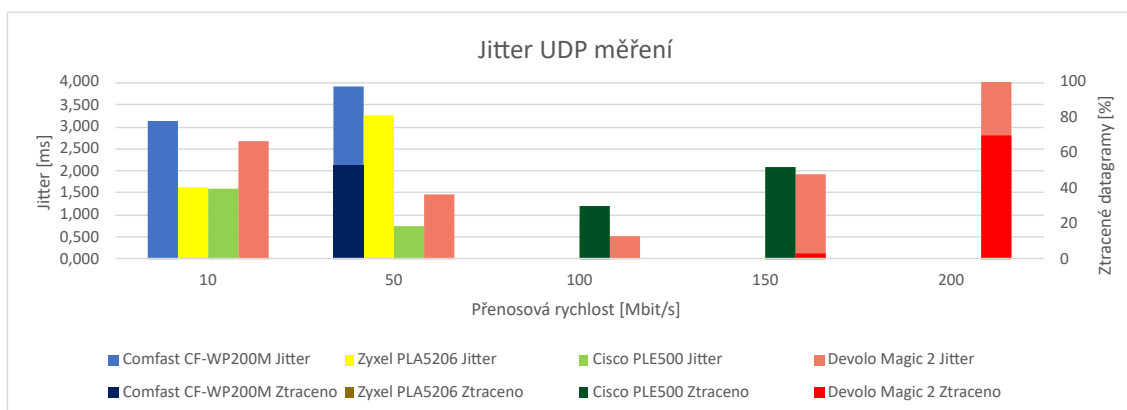
Zprůměrované výsledky jednotlivých zařízení jsou v tabulce 4.12. Následuje obrázek, kde je znázorněna ztrátovost pro měřená zařízení 4.13. Nejnižší hodnoty jitteru v pásmu 10 Mbit/s dosáhlo zařízení Cisco, které si udržovalo relativně nízkou hodnotu pod 2 ms až do přenosové rychlosti 100 Mbit/s. Devolo Magic 2 si tuto hodnotu udrželo až do rychlosti 150 Mbit/s, avšak při nastavené rychlosti 200 Mbit/s už tato hodnota překonala 14 ms – tomu nasvědčuje i průměrná 70 % ztrátovost dat vyjádřená v tabulce 4.12 na obrázku 4.14.



Obr. 4.13: Porovnání ztrátovosti datagramů.



Obr. 4.14: Porovnání UDP jitter.



Obr. 4.15: Celkové porovnání ztrátovosti a jitteru UDP měření.

Přenosová rychlost	Comfast CF-WP200M		Zyxel PLA5206		Cisco PLE500		Devolo Magic 2	
	Jitter [ms]	Ztraceno [%]	Jitter [ms]	Ztraceno [%]	Jitter [ms]	Ztraceno [%]	Jitter [ms]	Ztraceno [%]
10	3,123	0	1,612	0	1,600	0	2,671	0
50	3,919	53	3,262	0	0,739	0	1,470	0
100					0,860	30	0,526	0
150					2,095	52	1,920	3
200							14,743	71

Tab. 4.12: Porovnání jednotlivých zařízení

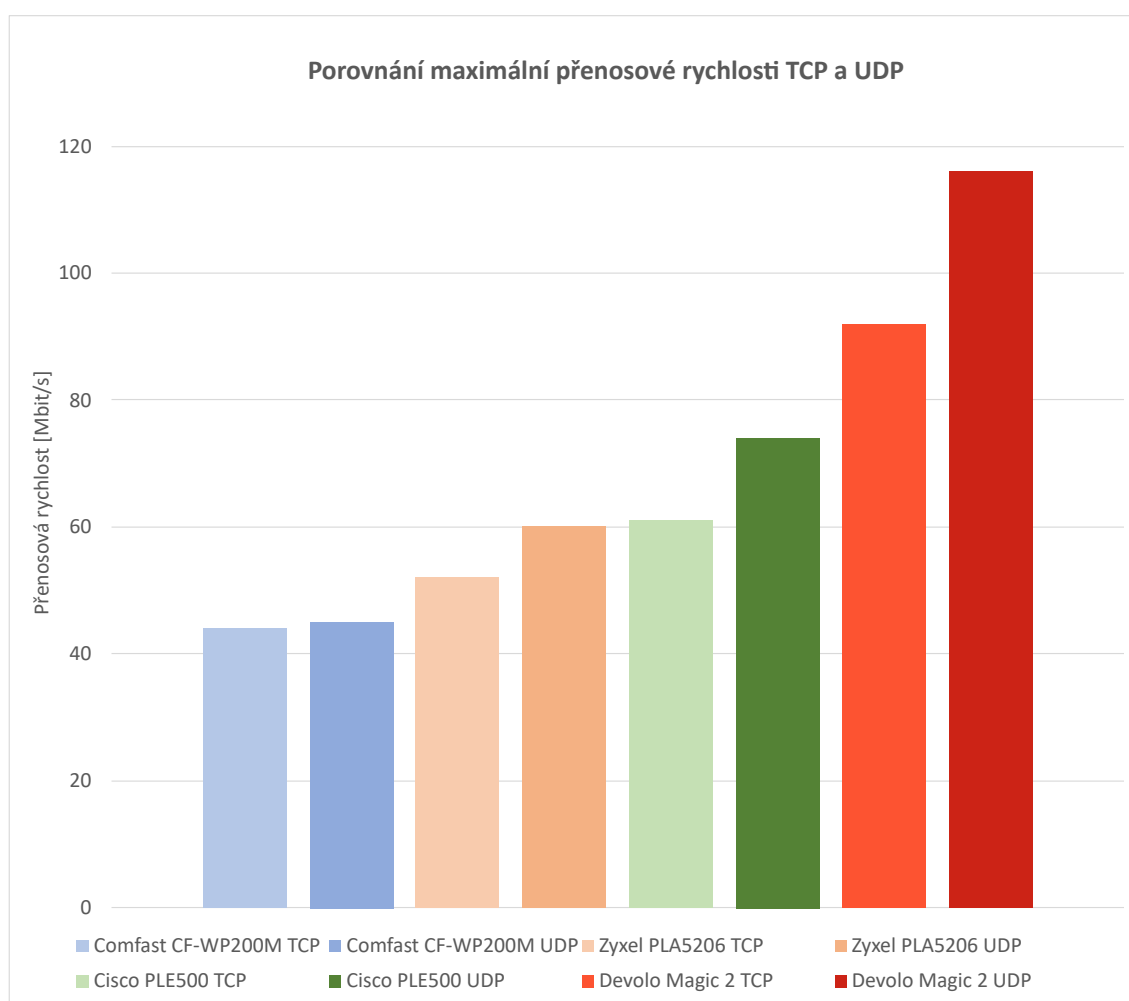
4.2.4 Porovnání TCP a UDP spojení

V následující tabulce 4.16 jsou porovnány měření protokolem TCP a protokolem UDP. TCP protokol ověřuje jestli vyslaná data dorazí v pořádku k cíli, proto je možné považovat naměřenou rychlost jako maximální, kterou dané zařízení může navázat s využitím protokolu TCP. Co se týče UDP, byla stanovena maximální ztrátovost do jednoho procenta z celkového počtu přenesených dat. V tabulce 4.13 jsou naměřené hodnoty TCP a UDP, u UDP byla nastavena taková přenosová rychlost při které ztrátovosti nepřekročí 1 %. Stejně jako v případě nastavení jednotlivých přenosových rychlostí v předchozím měření i v případě měření maximální rychlosti UDP byly provedeny tři měření a zprůměrovány.

Jak je z výsledků v tabulce 4.13 a následně na obrázku 4.16 patrné, v případě UDP spojení je přenosová rychlost vyšší. Největší rozdíl mezi naměřenými daty je v případě zařízení Devolo, zde je rozdíl mezi TCP a UDP více než 20 %. V případě modemů Zyxel a Cisco je rozdíl v rozmezí hodnot 15–20 %. Překvapivě nejmenší rozdíl je v případě zařízení Comfast a to 3 %, což je nejspíše dáno nižším vysílacím výkonem zařízení.

	Comfast CF-WP200M		Zyxel PLA5206		Cisco PLE500		Devolo Magic 2	
	TCP	UDP	TCP	UDP	TCP	UDP	TCP	UDP
Maximální přenosová rychlost [Mbit/s]	44	45	52	60	61	74	92	116
Rozdíl mezi TCP a UDP [%]	3		16		17		21	

Tab. 4.13: Maximální rychlost protokolem TCP a UDP.



Obr. 4.16: Porovnání přenosové rychlosti TCP a UDP.

Závěr

V první části bakalářské práce byla stručně popsána technologie PLC, její základní dělení a technická data. Následně byla stručně popsána technologie strojového učení v případě diagnostiky silnoproudé sítě.

V druhé části práce byly popsány fyzické některé parametry elektrického vedení. Z těchto parametrů byl následně navržen model, který slouží k prvotní analýze technického stavu elektrického vedení. Model fyzického stavu vedení (MFSV) porovnává fyzické parametry a ve výsledku popisuje technický stav sledovaného vedení. Tento model má sloužit jako prvotní indikátor stavu, a jestli je vůbec možné uvažovat o nasazení technologie PLC na dané silnoproudé trase. Koeficient ke svému výpočtu využívá fyzických parametrů silnoproudého vedení jako je staří a materiál kabelů a dalších částí kabelových souborů.

V poslední části práce bylo provedeno několik měření elektrické silnoproudé sítě v bytové jednotce. Měření bylo rozděleno na dvě hlavní části – proměření všech přístupových bodů jednoho okruhu a měření s prodlužovacím kabelem. Výsledky první části měření jasně dokazují, že v bytové jednotce je možné využít technologii komunikace po silnoproudém vedení PLC. V závislosti na použitém zařízení je možné provádět datové přenosy až do přenosové rychlosti 200 Mbit/s protokolem TCP bez využití standardu HomePlug AV2. Jelikož domácnost je vybavena 100 Mbit internetem, stačil by i modem nižší cenové třídy, například zmiňovaný Cisco, případně Zyxel. V druhé části měření byly změřeny parametry přenosu protokolem TCP a UDP s využitím 50 metrového prodlužovacího kabelu. Průměrná přenosové rychlosti protokolem TCP bylo dosaženo v rozmezí 50 Mbit/s. UDP přenosová rychlost byla o cca 20 % vyšší při zachování ztrátovosti datagramů do 1 %.

Literatura

- [1] SVOBODA, J; *Využívání silnoproudých vedení pro přenos zpráv (PLC, BPL)*, Vydalo: ČVUT. s. 27. ISBN: 978-80-01-06276-0.
- [2] FERREIRA, H.; LAMPE, L.; NEWBURY, J.; SWANT, T. In *Power Line Communications: Theory and Applications for Narrowband and Broadband Communications over Power Lines*, Červenec 2011. s. 536. ISBN: 978-1-119-95628-0.
- [3] HRASNICA, H; *Broadband Powerline Communications Network*, Vydalo: John Wiley and Sons, Chichester ISBN: 0-470-85741-2.
- [4] SVOBODA, P; *Širokopásmové metody přenosu dat po energetických sítích*, Brno, 2008. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: doc. Ing. Václav Zeman, Ph.D.
- [5] HRABČÍK, O; *Modely distribuční sítě*, Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: Ing. Petr Mlýnek
- [6] GREGOR, F; *Inteligentní systém pro dálkový sběr dat*, Brno, 2019. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Mlýnek, Ph.D.
- [7] BUSINESSINFO.CZ: *České firmy nejvíce využívají z umělé inteligence strojové učení* [online]. [cit. 27. 12. 2020]. Dostupné z URL: <České firmy nejvíce využívají z umělé inteligence strojové učení>.
- [8] BUSINESSINFO.CZ: *Strojové učení: S učitelem i bez něj* [online]. [cit. 19. 1. 2021]. Dostupné z URL: <Strojové učení: S učitelem i bez něj>.
- [9] TONELLO, A. M.; LETIZIA, N.A.; RIGNINI, D.; MARCUZZI, F; In *Machine Learning Tips and Tricks for Power Line Communications* [online]. [cit. 24. 1. 2021]. Dostupné z URL: <8737766>.
- [10] BRYCHTA, A; *Posilované učení pro hraní robotického fotbalu*, Brno, 2020. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií, Ústav počítačové grafiky a multimédií. Vedoucí práce: doc. RNDr. Pavel Smrž, Ph.D.

- [11] HUO, Y; PRASAD, G; LAMPE, L; LEUNG, V.C.M.; In *Advanced Smart Grid Monitoring: Intelligent CableDiagnostics using Neural Networks* [online]. [cit. 31. 12. 2020]. Dostupné z URL: <9115403>.
- [12] BENEŠL, L; *Vliv fyzických parametrů a stáří silnoprůvého vedení na výkonnost a spolehlivost PLC/BPL*, Brno, 2020. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Mlýnek, Ph.D.
- [13] OENERGETICE.CZ: *Jsou podzemní kabelová vedení řešením pro českou krajinu?* [online]. [cit. 23. 2. 2021]. Dostupné z URL: <Jsou podzemni kabelova vedeni resenim pro ceskou krajinu>.
- [14] BRANNÝ, J; *Spolehlivost dodávky elektrické energie v kabelových sítích distribuční soustavy*, Praha, 2018. Diplomová práce. ČVUT, Fakulta elektrotechnická
- [15] BRANNÝ, J; *Analýza poruch kabelového rozvodu vysokého napětí*, Praha, 2016. Bakalářská práce. ČVUT, Fakulta elektrotechnická
- [16] PLAČEK, I; *Diagnostika kabelů vysokého napětí*, Plzeň, 2012. Bakalářská práce. Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická
- [17] KESSLER, J. KABLO; *Silové kabely*, Kladno, 1978.
- [18] BENEŠL, L.; MLÝNEK, P.; *Elektrorevue svazek 22 číslo 2. Diagnostika VN kabelu pomocí PLC/BPL s vizualizací koeficientu technického stavu*, Duben 2020. ISSN 1213-1539.
- [19] PNE 34 7625; *VN kabely se zesíťnou PE izolací pro distribuční sítě do 35 kV*, Pátévydání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [20] COMFAST.COM: *CF-WP200M* [online]. [cit. 10. 3. 2021]. Dostupné z URL: <http://en.comfast.com.cn>.
- [21] ZYXEL.COM: *PLA5206* [online]. [cit. 10. 3. 2021]. Dostupné z URL: <https://www.zyxel.com/>.
- [22] LINKSYS.COM: *CISCO PLE500* [online]. [cit. 11. 3. 2021]. Dostupné z URL: <https://linksys.com>.
- [23] LINKSYS.COM: *DEVOLO MAGIC 2* [online]. [cit. 14. 3. 2021]. Dostupné z URL: <https://www.devolo.com>.

Seznam symbolů, veličin a zkratek

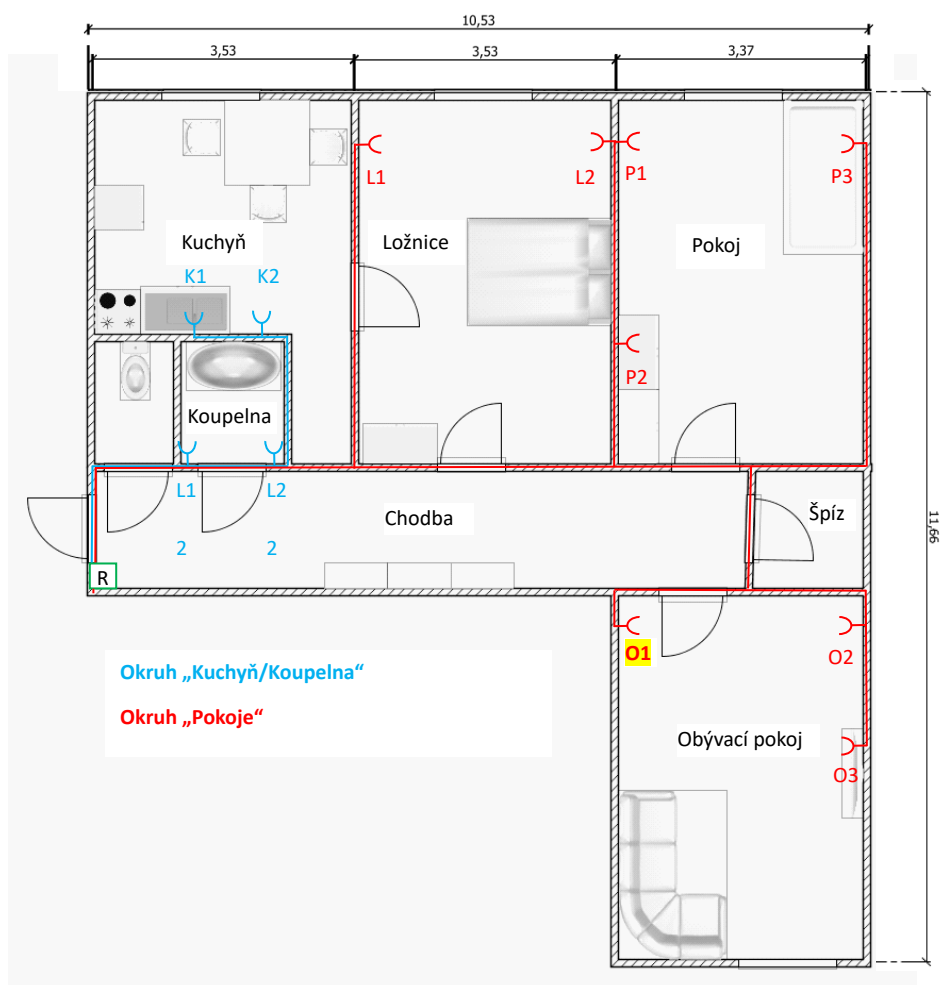
BER	Bit error rate
BLE	Bit load estimate
BPL	Broadband power line
CENELEC	Comité européen de normalisation électrotechnique
ČEPS	Česká přenosová soustava
ČEZ	České energetické závody
DTS	Distribuční trafostanice
ETH	Ethernet
FFNN	Feed forward neural network
KTS	Koeficient technického stavu
PE	Polyetylen
PHY	Physical layer transceiver
PILC	Paper insulated lead covered
PLC	Power line communication
PVC	Polyvinylchlorid
SNR	Signal to noise ratio
TCP	Transmission control protocol
LAN	Local area network
LPE	Linked polyethylene
MSE	Mean square error
MFSV	Model fyzického stavu vedení
UDP	User datagram protocol
VN	Vysoké napětí
VVN	Velmi vysoké napětí

NN	Nízké napětí
XLPE	Cross-linked polyethylene

Seznam příloh

A	Topologie měření	56
B	IPerf 3 vzor kódu	57
B.1	Comfast	57
B.2	Zyxel	57
B.3	Cisco	58
B.4	Devolo	58

A Topologie měření



Obr. A.1: Topologie bytu s měřeními body

B IPerf 3 vzor kódu

B.1 Comfast

```
iperf Done.
PS C:\Users\Jan\Desktop\iperf-3.1.3-win64> ./iperf3.exe -t 20 -c 169.254.61.48
Connecting to host 169.254.61.48, port 5201
[ 4] local 169.254.63.39 port 49734 connected to 169.254.61.48 port 5201
[ ID] Interval Transfer Bandwidth
[ 4] 0.00-1.00 sec 10.1 MBytes 84.5 Mbits/sec
[ 4] 1.00-2.01 sec 9.88 MBytes 82.5 Mbits/sec
[ 4] 2.01-3.01 sec 9.75 MBytes 82.1 Mbits/sec
[ 4] 3.01-4.01 sec 9.75 MBytes 81.8 Mbits/sec
[ 4] 4.01-5.00 sec 9.62 MBytes 81.2 Mbits/sec
[ 4] 5.00-6.01 sec 9.75 MBytes 81.3 Mbits/sec
[ 4] 6.01-7.01 sec 9.62 MBytes 80.9 Mbits/sec
[ 4] 7.01-8.00 sec 9.62 MBytes 81.1 Mbits/sec
[ 4] 8.00-9.01 sec 9.75 MBytes 81.4 Mbits/sec
[ 4] 9.01-10.01 sec 9.88 MBytes 82.6 Mbits/sec
[ 4] 10.01-11.00 sec 9.75 MBytes 82.3 Mbits/sec
[ 4] 11.00-12.01 sec 10.0 MBytes 83.3 Mbits/sec
[ 4] 12.01-13.01 sec 9.88 MBytes 83.0 Mbits/sec
[ 4] 13.01-14.01 sec 10.0 MBytes 83.7 Mbits/sec
[ 4] 14.01-15.00 sec 9.88 MBytes 83.6 Mbits/sec
[ 4] 15.00-16.00 sec 10.0 MBytes 83.7 Mbits/sec
[ 4] 16.00-17.01 sec 10.0 MBytes 83.4 Mbits/sec
[ 4] 17.01-18.00 sec 9.75 MBytes 82.6 Mbits/sec
[ 4] 18.00-19.00 sec 10.0 MBytes 83.9 Mbits/sec
[ 4] 19.00-20.00 sec 10.0 MBytes 83.8 Mbits/sec
[ ID] Interval Transfer Bandwidth
[ 4] 0.00-20.00 sec 197 MBytes 82.6 Mbits/sec sender
[ 4] 0.00-20.00 sec 197 MBytes 82.6 Mbits/sec receiver
```

Obr. B.1: Comfast O1-P3

B.2 Zyxel

```
iperf Done.
PS C:\Users\Jan\Desktop\iperf-3.1.3-win64> ./iperf3.exe -t 20 -c 169.254.61.48
Connecting to host 169.254.61.48, port 5201
[ 4] local 169.254.63.39 port 49725 connected to 169.254.61.48 port 5201
[ ID] Interval Transfer Bandwidth
[ 4] 0.00-1.01 sec 16.1 MBytes 134 Mbits/sec
[ 4] 1.01-2.00 sec 16.5 MBytes 139 Mbits/sec
[ 4] 2.00-3.00 sec 16.6 MBytes 139 Mbits/sec
[ 4] 3.00-4.00 sec 16.8 MBytes 140 Mbits/sec
[ 4] 4.00-5.00 sec 17.1 MBytes 144 Mbits/sec
[ 4] 5.00-6.00 sec 16.2 MBytes 137 Mbits/sec
[ 4] 6.00-7.01 sec 17.1 MBytes 143 Mbits/sec
[ 4] 7.01-8.00 sec 17.2 MBytes 145 Mbits/sec
[ 4] 8.00-9.00 sec 16.6 MBytes 140 Mbits/sec
[ 4] 9.00-10.00 sec 16.9 MBytes 142 Mbits/sec
[ 4] 10.00-11.01 sec 17.2 MBytes 144 Mbits/sec
[ 4] 11.01-12.01 sec 16.9 MBytes 141 Mbits/sec
[ 4] 12.01-13.01 sec 16.8 MBytes 141 Mbits/sec
[ 4] 13.01-14.01 sec 17.1 MBytes 143 Mbits/sec
[ 4] 14.01-15.00 sec 17.6 MBytes 149 Mbits/sec
[ 4] 15.00-16.00 sec 16.8 MBytes 140 Mbits/sec
[ 4] 16.00-17.00 sec 16.4 MBytes 138 Mbits/sec
[ 4] 17.00-18.00 sec 16.2 MBytes 136 Mbits/sec
[ 4] 18.00-19.00 sec 16.6 MBytes 139 Mbits/sec
[ 4] 19.00-20.01 sec 16.8 MBytes 140 Mbits/sec
[ ID] Interval Transfer Bandwidth
[ 4] 0.00-20.01 sec 336 MBytes 141 Mbits/sec sender
[ 4] 0.00-20.01 sec 336 MBytes 141 Mbits/sec receiver
```

Obr. B.2: Zyxel O1-P3

B.3 Cisco

```
iperf Done.
PS C:\Users\Jan\Desktop\iperf-3.1.3-win64> ./iperf3.exe -t 20 -c 169.254.61.48
Connecting to host 169.254.61.48, port 5201
[ 4] local 169.254.63.39 port 49739 connected to 169.254.61.48 port 5201
[ ID] Interval      Transfer    Bandwidth
[ 4] 0.00-1.00    sec 13.4 MBytes 112 Mbits/sec
[ 4] 1.00-2.00    sec 13.5 MBytes 113 Mbits/sec
[ 4] 2.00-3.00    sec 13.6 MBytes 114 Mbits/sec
[ 4] 3.00-4.00    sec 13.6 MBytes 114 Mbits/sec
[ 4] 4.00-5.00    sec 14.0 MBytes 118 Mbits/sec
[ 4] 5.00-6.01    sec 14.6 MBytes 122 Mbits/sec
[ 4] 6.01-7.00    sec 14.6 MBytes 124 Mbits/sec
[ 4] 7.00-8.00    sec 14.8 MBytes 123 Mbits/sec
[ 4] 8.00-9.01    sec 14.8 MBytes 123 Mbits/sec
[ 4] 9.01-10.00   sec 14.8 MBytes 125 Mbits/sec
[ 4] 10.00-11.00  sec 14.9 MBytes 125 Mbits/sec
[ 4] 11.00-12.01  sec 14.8 MBytes 124 Mbits/sec
[ 4] 12.01-13.01  sec 14.8 MBytes 123 Mbits/sec
[ 4] 13.01-14.00  sec 14.5 MBytes 123 Mbits/sec
[ 4] 14.00-15.00  sec 14.8 MBytes 123 Mbits/sec
[ 4] 15.00-16.01  sec 14.9 MBytes 125 Mbits/sec
[ 4] 16.01-17.00  sec 14.9 MBytes 125 Mbits/sec
[ 4] 17.00-18.00  sec 14.6 MBytes 123 Mbits/sec
[ 4] 18.00-19.00  sec 14.9 MBytes 124 Mbits/sec
[ 4] 19.00-20.00  sec 14.9 MBytes 125 Mbits/sec
[ ID] Interval      Transfer    Bandwidth
[ 4] 0.00-20.00   sec 289 MBytes 121 Mbits/sec
[ 4] 0.00-20.00   sec 289 MBytes 121 Mbits/sec
```

Obr. B.3: Cisco O1-P3

B.4 Devolo

```
iperf Done.
PS C:\Users\Jan\Desktop\iperf-3.1.3-win64> ./iperf3.exe -t 20 -c 169.254.61.48
Connecting to host 169.254.61.48, port 5201
[ 4] local 169.254.63.39 port 60649 connected to 169.254.61.48 port 5201
[ ID] Interval      Transfer    Bandwidth
[ 4] 0.00-1.01    sec 7.12 MBytes 59.5 Mbits/sec
[ 4] 1.01-2.01    sec 11.8 MBytes 98.5 Mbits/sec
[ 4] 2.01-3.00    sec 18.4 MBytes 154 Mbits/sec
[ 4] 3.00-4.00    sec 19.8 MBytes 166 Mbits/sec
[ 4] 4.00-5.00    sec 19.9 MBytes 166 Mbits/sec
[ 4] 5.00-6.00    sec 20.0 MBytes 168 Mbits/sec
[ 4] 6.00-7.00    sec 20.1 MBytes 169 Mbits/sec
[ 4] 7.00-8.00    sec 20.2 MBytes 170 Mbits/sec
[ 4] 8.00-9.01    sec 19.9 MBytes 166 Mbits/sec
[ 4] 9.01-10.00   sec 20.2 MBytes 171 Mbits/sec
[ 4] 10.00-11.00  sec 19.5 MBytes 164 Mbits/sec
[ 4] 11.00-12.00  sec 19.9 MBytes 166 Mbits/sec
[ 4] 12.00-13.00  sec 19.9 MBytes 167 Mbits/sec
[ 4] 13.00-14.00  sec 20.0 MBytes 167 Mbits/sec
[ 4] 14.00-15.00  sec 19.8 MBytes 166 Mbits/sec
[ 4] 15.00-16.00  sec 19.5 MBytes 164 Mbits/sec
[ 4] 16.00-17.01  sec 20.1 MBytes 168 Mbits/sec
[ 4] 17.01-18.00  sec 20.1 MBytes 169 Mbits/sec
[ 4] 18.00-19.00  sec 20.1 MBytes 169 Mbits/sec
[ 4] 19.00-20.00  sec 20.4 MBytes 170 Mbits/sec
[ ID] Interval      Transfer    Bandwidth
[ 4] 0.00-20.00   sec 377 MBytes 158 Mbits/sec
[ 4] 0.00-20.00   sec 377 MBytes 158 Mbits/sec
```

Obr. B.4: Devolo O1-P3